



TESIS - TL142501

**STUDI PERFORMA *BLAST FURNACE* DENGAN
SUMBER REDUKTAN ARANG BERBASIS
PEMODELAN**

ANNI RAHMAT

NRP 2713201203

Dosen Pembimbing :

Sungging Pintowantoro, S.T.,M.T., Ph.D

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN METALURGI MANUFAKTUR

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016



THESIS - TL142501

**STUDY OF BLAST FURNACE PERFORMANCE
WITH CHARCOL FOR REDUCTAN BASE ON
SIMULATION**

ANNI RAHMAT

NRP 2713201203

ADVISOR

Sungging Pintowantoro, S.T.,M.T., Ph.D

MAGISTER PROGRAM

METALURGY AND MATERIAL ENGINEERING

INSTITUTUTE TECHNOLOGI OF SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016

LEMBAR PENGESAHAN

TESIS

**Tesis Ini Disusun Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Magister Teknik (M.T)**

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

Anni Rahmat

NRP. 2713 201 203

Tanggal Ujian : 19 Januari 2016

Periode Wisuda : September 2016

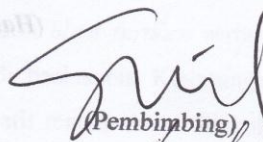
Disetujui oleh:

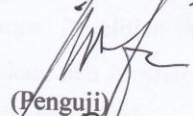
1. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 1968 0930 200003 1 001

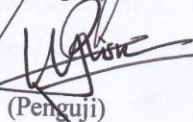
2. Mas Irfan P H, S.T., M.Sc., Ph.D
NIP. 1976 1027 200312 1 001

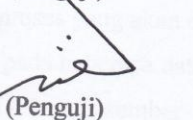
3. Dr.Eng. Victor Y isonarta, S.T., M.Sc
NIP. --

4. Dr. Lukman Noerochim, S.T, M.T.Sc
NIP. 1977 1303 20030412 1 001

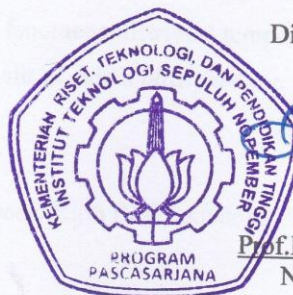

(Pembimbing)

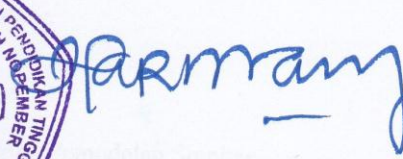

(Penguji)


(Penguji)


(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,




Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D
NIP. 19601202 198701 1 001

STUDI PERFORMA *BLAST FURNACE* DENGAN SUMBER REDUKTAN ARANG BERBASIS PEMODELAN

Nama mahasiswa : Anni Rahmat
NRP : 2713201203
Pembimbing : Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Indonesia adalah negara yang memiliki sumber daya alam mineral bijih besi, akan tetapi tidak mempunyai kemampuan mengolah bijih besi menjadi besi spon. Investasi yang tinggi dan minimnya kajian *blast furnace* menjadikan penguasaan teknologi *blast furnace* tidak dikuasai. Solusi untuk mengurai permasalahan ini adalah dengan melakukan kajian *blast furnace* secara numerik sehingga didapatkan desain *blast furnace* serta parameter proses yang ada dalam pengolahan bijih besi menjadi besi spon. Keuntungan dengan menggunakan metode ini adalah dengan biaya yang relatif rendah dapat dilakukan kajian mendalam mengenai fenomena yang terjadi dalam *blast furnace*. Penelitian ini dimulai dengan melakukan *running* ulang pemodelan yang telah dilakukan oleh *Institute of Multi-disciplinary Research for Advanced Material* di Tohoku University. Hal ini dilakukan sebagai langkah awal untuk mengetahui data input seperti geometri *blast furnace*, jenis ore dan parameter proses yang digunakan pada penelitian sebelumnya. Data input ini selanjutnya akan diubah sesuai dengan variabel dan parameter proses yang akan dilakukan pada penelitian ini. Pada penelitian ini akan memuat perbedaan pada beberapa data inputan seperti geometri *blast furnace* dengan working volume 3914.1 m^3 , sumber reduktan menggunakan arang dan batubara, ore menggunakan hematit dari Solok. Hasil pemodelan ini dapatkan diketahui fenomena distribusi temperatur, tekanan, distribusi gas monoksida dan dioksida serta laju alir di dalam *blast furnace*.

Kata Kunci: *Blast Furnace*, Bijih Besi Sumatera, Pemodelan Smelter.

THE STUDY OF BLAST FURNACE PERFORMANCE WITH CHARCOL FOR REDUCTAN BASE ON SIMULATION

Student Name : Anni Rahmat
ID Number : 2713201203
Advisor : Sungging Pintowantoro, S.T, M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Indonesia has abundant deposit of iron ore. But, Indonesia isn't capable yet to process the iron ore it self to be pig iron. As a consequence, the technology process the iron ore is not controlled because of high investment and a lack of research about blast furnace. The solution of this problem is to make the research numerically blast furnace so the design can be learned. The advantage this method is low cost reasearch and phenomenom of the blast furnace can be conscientious. This research was started by resimulation has been done by Institute of Multi-disciplinary Research for Advanced Material at Tohoku University. It's to determine input data such as blast furnace geometry, iron ore type, and process parameters in old research. On other hands,for this research input data will be converted according new variabel and process parameter. In this reasearch blast furnace will be simulation using working volume 3914.1 m^3 , palm kernel shell charcoal used for reductan and hematit iron ore from Borneo Island. The result of blast furnace simulation are distribution temperature, pressure and velocity in blast furnace. After simulation done, this research obtained the optimum processing variables which produced the most pig iron production.

Keywords : *Blast Furnace process modelling, Solok iron ore, mineral process modelling.*

DAFTAR ISI

	HALAMAN
LEMBAR PENGESAHAN.....	i
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
 BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
 BAB II DASAR TEORI DAN KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Besi dan Bijih Besi.....	5
2.2 Blat Furnace	8
2.3 Reaksi Kimia Dan Transformasi Fase Di Dalam Blast Furnace.....	12
2.4 Pemodelan Blast Furnace.....	15
2.5 Analisis Numerik Deposisi Powder Pada Blast Furnace Berdasarkan Teori Multi-Fluid.....	16
2.5.1 Persamaan Momentum.....	17
2.5.2 Persamaan Perpindahan Panas.....	19
2.5.3 Persamaan Pergerakan Powder Statik	21
2.5.4 Persamaan Material Propertis pada Blast Furnace.....	22

2.6 Kinematika Rekasi Dan Transport Masa.....	29
2.7 Teknologi dan Penelitian Terkait <i>Smelting</i> Mineral Tembaga Sebelumnya.....	33

BAB III METODOLOGI PENELITIAN35

3.1 Diagram Alir Pemodelan	35
3.2 Geometri Blast Furnace	36
3.3 Komposisi Unsur Bijih Besi.....	37
3.4 Material Propertis.....	37
3.4.1 Sifat Fase Gas.....	38
3.4.2 Sifat Fase Solid	39
3.4.3 Sifat Slag Cair.....	40
3.4.5 Sifat Powder.....	41
3.5 Bahasa Fortran	42
3.6 Peralatan dan Perlengkapan Penunjang penelitian.....	42
3.7 Tahapan Penelitian.....	46
3.8 Jadwal Penelitian.....	54

BAB IV ANALISA DATW DAN PEMBAHASAN.....55

4.1 Validasi Pemodelan Blast Furnace.....	55
4.2 Analisa Distribusi Temperatur	62
4.2.1 Faktor Ukuran Diameter Injeksi Serbuk Reduktor /PKS....	62
4.2.2 Faktor Jumlah Injeksi Serbuk Reduktor/PKS.....	65
4.3 Analisa Distribusi Gas Karbon Monoksida dan Dioksida.....	67
4.3.1 Faktor Ukuran Diameter Injeksi Serbuk Reduktor /PKS....	67
4.3.2 Faktor Jumlah Injeksi Serbuk Reduktor/PKS.....	71
4.4 Analisa Distribusi Tekanan.....	74
4.4.1 Faktor Ukuran Diameter Injeksi Serbuk Reduktor /PKS....	74
4.4.2 Faktor Jumlah Injeksi Serbuk Reduktor/PKS.....	76

4.5 Analisa Distribusi Kecepatan.....	78
4.5.1 Faktor Ukuran Diameter Injeksi Serbuk Reduktor /PKS....	78
4.5.2 Faktor Jumlah Injeksi Serbuk Reduktor/PKS.....	80

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 83

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1Komposisi Kimia Besi Bijih Besi di Solok Sumatera.....	6
Tabel 2.2 Bijih Besi Di Indonesia.....	8
Tabel 2.3 Reaksi Pada Proses Peleburan Bijih Besi Di <i>Blast Furnace</i>	13
Tabel 2.4 Reaksi Transformasi Fasa Pada Proses Peleburan <i>Blast Furnace</i>	15
Tabel 3.1 Komposisi Biji Besi Solok.....	37
Tabel 3.2 Fase Dan Spesies Kimia.....	38
Tabel 3.3 Koeffisien Untuk Persamaan <i>Heat Capacity</i> Fase Gas.....	38
Tabel 3.4 Panas Pembentukan.....	39
Tabel 3.5 Koeffisien Untuk Persamaan <i>Heat Capacity</i> Fase Solid dan Powder.....	39
Tabel 3.6 Panas Pembentukan Solid.....	40
Tabel 3.7 Parameter Arang Pada Pemodelan.....	41
Tabel 3.8 Parameter Powder Pada Pemodelan.....	41
Tabel 3.9 Berat Molekuler.....	41
Tabel 4.1 Parameter Operasi Model 2D.....	55
Tabel 4.2 Parameter Operasi Model 3D.....	55
Tabel 4.3 Parameter Operasi <i>blast furnace</i> (PKS Injection 100kg/tlc).....	62
Tabel 4.4 Parameter Operasi Berdasarkan Jumlah Serbuk Arang.....	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bijih besi hematit.....	5
Gambar 2.2 Bijih besi laterit.....	6
Gambar 2.3 Pasir besi.....	7
Gambar 2.4 Peta sebaran mineral lain di Indonesia.....	8
Gambar 2.5 Hembusan udara panas pada daerah raceway.....	10
Gambar 2.6 Skematik <i>Blast furnace</i>	11
Gambar 3.1 Diagram Alir Pemodelan.....	35
Gambar 3.2. Geometri blast furnace.....	36
Gambar 3.3. <i>XRF mining analyser</i>	43
Gambar 3.4. Layout Perangkat Lunak Studio Developer.....	44
Gambar 3.5. layout Paraview.....	45
Gambar 3.6. Layout Tecplot.....	46
Gambar 3.7. Skema tahapan eksekusi bahasa fortran.....	50
Gambar 3.8. Skema langkah plotting pada tecplot.....	51
Gambar 3.9. Skema langkah plotting tiga dimensi.....	53
Gambar 4.1. Perbandingan perhitungan dan pengukuran distribusi temperatur oleh Nagomi dan Sungging dengan jumlah reduktor yang diinjeksikan 200kg/tlc.....	56
Gambar 4.2. Perbandingan kontur distribusi temperatur dua dimensi dan tiga dimensi pemodelan <i>blast furnace</i>	57
Gambar 4.3 Perbandingan Kontur Distribusi Fraksi Volume CO _(g) pada model dua dan tiga dimensi <i>blast furnace</i>	58
Gambar 4.4 Perbandingan kontur distribusi tekanan pada model dua dan tiga dimensi <i>blast furnace</i>	60
Gambar 4.5 Perbandingan kontur distribusi kecepatan dua dimensi dan tiga dimensi pemodelan <i>blast furnace</i>	61
Gambar 4.6 Distribusi temperatur <i>blast furnace</i> karena faktor ukuran diameter serbuk reduktor.....	63

Gambar 4.7 Distribusi temperatur <i>blast furnace</i> karena jumlah serbuk reduktor.....	66
Gambar 4.8 Distribusi gas CO pada <i>blast furnace</i> karena faktor ukuran diameter serbuk reduktor.....	68
Gambar 4.9 Distribusi gas CO ₂ pada <i>blast furnace</i> karena faktor ukuran diameter serbuk reduktor.....	69
Gambar 4.10 Distribusi gas CO pada <i>blast furnace</i> karena factor jumlah serbuk reduktor yang di injeksikan.....	72
Gambar 4.11 Distribusi gas CO ₂ pada <i>blast furnace</i> karena factor jumlah serbuk reduktor yang di injeksikan.....	73
Gambar 4.12 Distribusi tekanan pada <i>blast furnace</i> karena faktor ukuran diameter serbuk reduktor yang di injeksikan.....	75
Gambar 4.13 Distribusi tekanan pada <i>blast furnace</i> karena faktor jumlah serbuk reduktor yang di injeksikan.....	77



Fe_3O_4 dengan kadar Fe teoritis maksimal mencapai 72 %. Potensi endapan bijih besi tersebar dalam enam kabupaten di Kalimantan Selatan seperti di P. Suwangi-Kotabaru, Gunung Kukusan-Tanah Bumbu, Plaihari-Tanah Laut, Batu Berani-Balangan, Purui-Tabalong dan lainnya. Secara kuantitatif konten Fe bijih besi didaerah ini cukup untuk diproses lebih lanjut dalam industri *iron making* dengan keluaran untuk pasokan industri *steel making*. Hematit adalah bijih besi primer lainnya yang memiliki rumus kimia Fe_2O_3 dengan kadar Fe teoritis dapat mencapai 70%. Di Indonesia jenis bijih besi primer banyak di temukan di Pulau Kalimantan dan Sumatera.

Tabel 2. 1 Komposisi kimia besi bijih besi di Solok Sumatera

Tipe Bijih	Fe Total	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Cr_2O_3	P	S	Ni	LOI
Lateritic	40-56	3-12	0,5-2	0,5-2	5-13	1-2,5	0,05-0,1	0,05-0,1	0,15-0,25	5-15
Metasomatic (Magnetit & Hematit)	30-63	3-15	0,5-2	0,5-2	2-15	<0,1	<0,1	<0,1	-	<2

(Sumber : Bambang pardiarto, 2009)

- Bijih besi jenis hidroksida



Gambar 2. 2 Bijih besi laterit

Bijih besi jenis hidroksida adalah bijih besi yang memiliki kandungan kadar Fe teoritis berkisar 30-50 %. Bijih besi yang masuk dalam golongan bijih besi hidroksida adalah laterit dengan rumus kimia $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, Goethit dengan rumus kimia $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dan Limonit dengan rumus kimia $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Pada geografis

Indonesia bijih besi jenis oksida ini tersebar di kawasan Pulau Sulawesi, Pulau Kalimantan dan Pulau Sumatera. Bijih besi jenis hidroksida masih sangat ekonomis untuk dapat diolah menjadi bahan baku industri pembuatan besi dan baja. Jumlah yang lebih banyak menjadikan pula potensi bagi bijih besi hidroksida untuk dapat secara optimal dimanfaatkan.

- Bijih besi jenis titanious ferrous



Gambar 2.3 Pasir besi

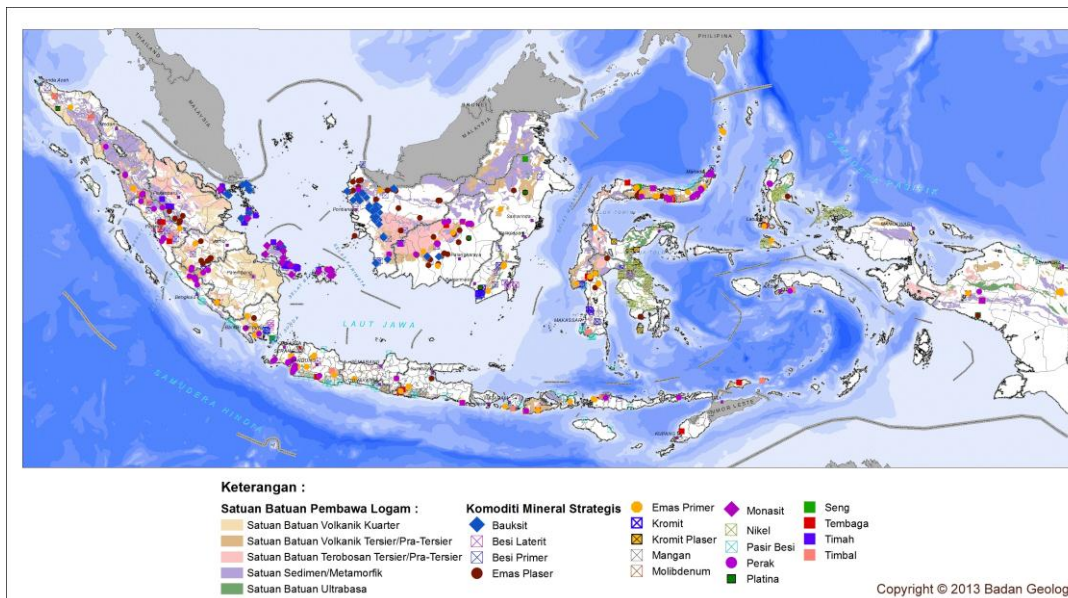
Bijih besi berikutnya yang terdapat dalam geografis wilayah Indonesia adalah bijih besi jenis titanious ferrous. Bijih besi jenis titanious ferrous terdapat dalam pasir besi. Pasir besi adalah salah satu jenis bijih besi yang saat ini banyak di ekspor ke China. Bijih besi jenis ini pada umumnya memiliki kandungan Fe berkisar antara 13-25 % dengan rumus kimia $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$. Pasir besi di Indonesia tersebar pada beberapa pulau seperti pulau Jawa, Pulau Nusa Tenggara dan Pulau Sumatera untuk detail lokasi dapat dilihat pada gambar 2.4.

Secara ringkas bijih besi di Indonesia tersaji dalam tabel 2.2 dibawah ini dengan rumus kima dan kandungan Fe teoritis pada masing masing jenis bijih besi.

Tabel 2. 2 Bijih besi di Indonesia

No	Tipe	Mineral	Rumus Kima	%Fe Teoritis
1	Bijih besi primer	Magnetit	Fe_3O_4	max 72
		Hematit	Fe_2O_3	max 70
2	Bijih besi jenis hidroksida	Laterit	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	max 55
		Goethit	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	max 53
		Limonit	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	max 50
3	Bijih besi jenis titanious ferrous	Pasir besi	$\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$	13-25

(Suymer : Bambang, 2012)



Gambar 2.4 Peta sebaran mineral lain di Indonesia (Badan Geologi, 2013)

2.2 Blast Furnace

Blast furnace adalah suatu reaktor dimana pada umumnya berdimensi diameter 12 m dan tinggi 30 m dengan prinsip kerja *conter current flow*, tinggi total *blast furnace* akan naik jika telah terpasang peralatan charging material pada bagian atas *blast furnace*. Secara struktur pada umumnya *blast furnace* di bangun dengan menggunakan baja silinder yang dibagi dalam beberapa segmen dimana baja silinder ini berfungsi sebagai penopang dan penutup. Pada bagian dalam baja silinder akan dilapisi dengan batu tahan api (refaktori). Struktur *blast furnace*



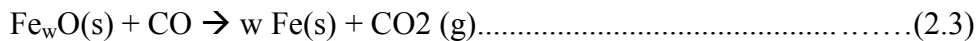
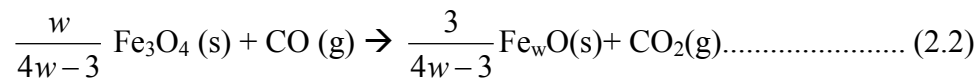
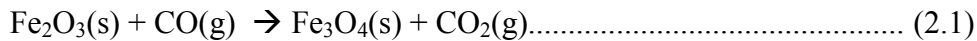
berbentuk silinder memanjang dengan bagian atas dan bagian bawah dibuat meruncing/ konus. Pada puncak dari *blast furnace* terdapat *hopper* dan pembuangan gas setinggi 3 m. Sistem pemasukan material umpan termasuk arang dan bijih besi/ore terdapat pada bagian atas *blast furnace* melalui *hopper* yang mengatur distribusi material umpan terdistribusi merata, selanjutnya material umpan akan mengalami pemanasan awal pada area *preheat* dan mengalami melting pada area *melting* serta mengalami superheat dan tereduksi pada area reduksi. Tahap akhir dari proses *blast furnace* adalah pengeluaran logam cair dan *slag* yang dikeluarkan melalui lubang yang terpisah untuk logam cair dan slag. Kedua lubang keluaraan ini terpisah dengan prinsip kerja memanfaatkan berat jenis dari logam cair dan *slag*. Pada bagian bawah *blast furnace* atau disebut *bosh* dilengkapi dengan beberapa lubang pembuka atau tuyer. Tuyer memiliki fungsi sebagai pensuplai udara yang akan membuat tiupan aliran udara panas. Pada bagian bawah dekat dengan dasar *bosh* terdapat *tapping hole* atau lubang yang berfungsi sebagai tempat mengalirnya logam cair hasil proses dari *blast furnace*. Tuyer terletak diatas *tapping hole* dengan bentuk tuyer pada umumnya melingkar mengelilingi *blast furnace*. Struktur tuyer biasanya terdiri dari sabuk pipa silinder yang diletakkan pada bagian luar *blast furnace* dan diberikan pipa pengalir masuk kebagian dalam *blast furnace* dengan pipa pengalir berdiamter lebih kecil dibanding dengan pipa sabuk. Desain dari tuyer ini memberikan andil pada tingkat keberhasilan proses dalam *blast furnace*. Pada bagian ini terdapat lubang untuk mengalirkan slag. Lubang ini biasanya terletak pada area dibawah tuyere dan diatas *tapping hole* .

Bagian dalam *blast furnace* terbagi atas tiga struktur fisik (Austin, 2006) yaitu:

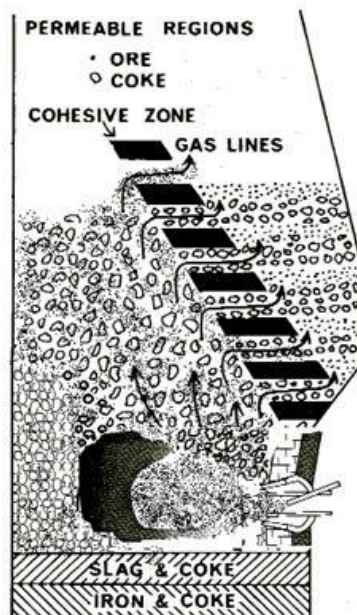
1. Raceway

Raceway adalah area dimana banyak terdapat kekosongan atau void dikarenakan terdapat hembusan fluida/udara bertekanan dan berkecepatan tinggi dari tuyer. Karena hembusan udara ini maka energi panas atau termal terbentuk dan pada area ini temperatur tertinggi *blast furnace* berada pada area ini. Energi panas yang terbentuk akan memanaskan arang dan terjadi reaksi sehingga terbentuk karbon monoksida dan karbon dioksida.

Karbon monoksida merupakan gas reduktan yang dapat mereduksi oksida besi secara tak langsung. Kebolehan jadian reduksi oksida besi secara tak langsung terjadi dalam bentuk tiga tahapan reaksi kimia berikut ini (Castro, 2005)



Panas dari reaksi di area raceway juga membentuk gas panas, dimana gas ini akan bergerak ke atas menjadi pemanas awal material umpan saat masuk pada bagian atas *blast furnace*. Skematik bentuk raceway pada *blast furnace* terdapat pada ilustrasi Gambar 2.5.

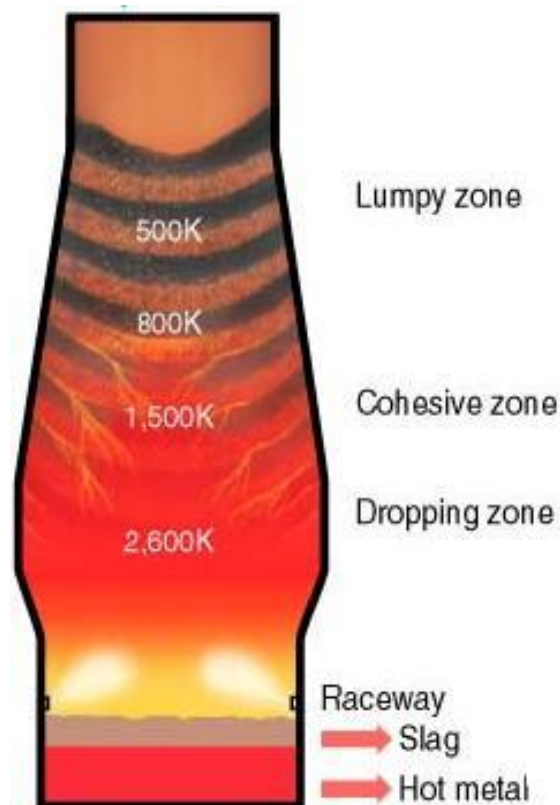


Gambar 2. 5 Hembusan udara panas pada daerah raceway (Nagomi, 2006)

2. Cohesive Zone (Area Kohesif)

Pada area kohesif ini material umpan (ore, sinter atau pellet) meleleh dan mencair. Proses pencairan material umpan ini menjadi batas kondisi untuk menentukan laju pencairan dan laju produksi dari proses di *blast furnace*. Pada

saat terjadi fenomena pencairan dari material padat ke cair material akan mengalami penurunan sifat permabilitasnya (Sungging,2005). Faktor ini yang harus diperhatikan sehingga suplai udara yang di hembuskan melalui tuyer tetap menjaga kecepatan aliran dalam *blast furnace* stabil. Pada area ini material solid berada pada temperatur 1200 – 1400 C. Area kohesif dapat mempresentasikan beberapa perbedaan bentuk bergantung dengan kondisi proses.



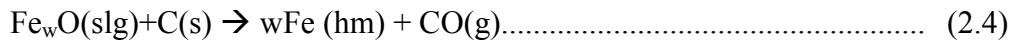
Gambar 2. 6 Skematik *Blast furnace* (Natsui, 2011)

3. Deadman

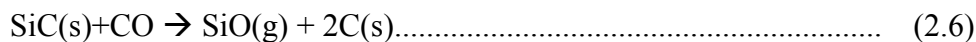
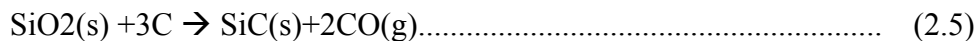
Pada area ini terdapat pergerakan yang sangat lambat dari fase solid atau dapat diartikan area statik. Deadman berbentuk konikal terletak pada bagian tengah *bosh* , pada area deadman arang diam dalam jangka waktu yang lama-harian (Castro,2006). Pada umumnya pada daerah deadman ukuran arang lebih kecil dibanding dengan rata rata ukuran arang pada *blast furnace* yang dapat mengakibatkan reaksi dilusi dari karbon, reduksi secara langsung oksida besi dan



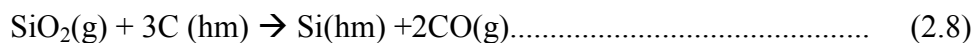
transfer silika. Reaksi reduksi langsung pada proses pengolahan bijih besi melibatkan karbon dari arang dan merupakan reduktan yang kuat. Reaksi reduksi ini merupakan reaksi endotermik yang sangat kuat sehingga membutuhkan temperatur yang tinggi. Reaksi kimia reduksi oksida besi secara langsung oleh karbon adalah sebagai berikut.



Selain reaksi reduksi secara langsung oksida besi oleh reduktan karbon, pada area ini juga terjadi transfer silika. Transfer silika juga merupakan proses yang sangat penting setelah proses reduksi oksida besi. Pada transfer silika, silika akan menjadi silika dalam bentuk gas dan abu. Secara partial silika akan tereduksi menjadi SiC atau Gas SiO. Proses pembentukan SiC dan gas SiO sesuai dengan reaksi dibawah ini



Gas SiO akan kembali teroksidasi saat pendinginan atau tereduksi saat mengalami kontak dengan logam cair (Sungging,2005). Reaksi terjadi saat pembentukan logam dan slag



2.3 Reaksi Kimia dan Transformasi fase di dalam *Blast furnace*

Sembilan belas reaksi kimia dan sembilan transformasi fasa terjadi pada proses dalam *blast furnace*. Oksida besi dalam bijih besi teroksidasi secara tidak langsung oleh karbon monoksida dan gas hidrogen, sedangkan reduksi secara langsung oleh karbon. Pembakaran dan gasifikasi karbon oleh oksigen yang terdapat pada daerah raceway menghasilkan gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida. Proses pembakaran dan gasifikasi karbon ini terjadi pada saat



karbon pada fase solid dan powder (arang). Karbon digunakan dalam reaksi pembentukan gas hidrogen dan *solution loss* dengan temperatur reaksi berkisar 900 °C (Hiroshi Nagomi, 2006).

Reaksi antara gas hidrogen dan gas karbon dioksida menghasilkan produk berupa gas karbon dioksida dan uap air. Reaksi ini adalah reaksi reversible untuk menjaga spesies karbon dan gas hydrogen (Iwanaga, 1991). Volatile muncul pada saat arang pada bentuk powder yang homogen bereaksi dengan gas oksigen dan gas karbon dioksida. Reaksi ini terjadi pada daerah pembakaran dan berlangsung dengan sangat cepat.

Rangkuman reaksi kimia dan transformasi fasa yang terjadi selama proses peleburan di *blast furnace* seperti tergambar dalam tabel 2.3 dan tabel 2.4 dibawah ini.

Tabel 2. 3 Reaksi pada proses peleburan bijih besi di *blast furnace*

No	Reaksi Kimia	Keterangan
1.	$3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung hematite oleh CO
2.	$\frac{w}{4w-3}\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) \rightarrow \frac{3}{4w-3}\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung magnetit oleh CO
3	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{CO}(\text{s}) \rightarrow w\text{Fe}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung wustite oleh CO
4.	$3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung hematite oleh H ₂
5	$\frac{w}{4w-3}\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \frac{3}{4w-3}\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung magnetit oleh H ₂
6.	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow w\text{Fe}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	Reduksi secara tidak langsung wustit oleh H ₂
7.	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{s}) + \text{C}(\text{s}) \rightarrow w\text{Fe}(\text{l}) + \text{C}(\text{g})$	Reduksi langsung
8	$\text{C}(\text{s}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}(\text{g})$	Partial combustion
9	$\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$	Full combustion
10	$\text{C}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}(\text{g})$	Reaksi solution loss



No	Reaksi Kimia	Keterangan
11	$C(s) + H_2O(g) \rightarrow CO(g) + H_2(g)$	Reaksi pembentukan gas hidrogen
12	$CO_2(g) + H_2(g) \leftrightarrow CO(g) + H_2O(g)$	Reaksi pembentukan uap air
13	$Volatile(f) + \alpha_1 O_2(g) \rightarrow \alpha_2 CO_2(g) + \alpha_3 H_2O(g) + \alpha_4 N_2(g)$	Pembakaran Volatil
14	$Volatile(f) + \alpha_1 CO_2(g) \rightarrow \alpha_2 CO(g) + \alpha_3 H_2(g) + \alpha_4 N_2(g)$	Reaksi <i>solution loss</i> pada volatil
15	$SiO_2(s) + C(s) \leftrightarrow SiO(g) + CO(g)$	Gasifikasi silika pada arang
16	$SiO_2(s) + 3C(s) \leftrightarrow SiC(hm) + 2CO(g)$	Reaksi pembentukan SiC
17	$SiC(s) + CO(g) \leftrightarrow SiO(g) + 2C(s)$	Reaksi gasifikasi SiC
18	$SiO_2(slag) + C(s) \rightarrow SiO(g) + CO(g)$	Reaksi gasifikasi silika pada slag
19	$SiO(g) + C(hm) \rightarrow Si(hm) + CO(g)$	Reaksi reduksi SiO

Tabel 2. 4 Reaksi transformasi fasa pada proses peleburan di *blast furnace*

No	Transformasi fasa	Keterangan
1	$H_2O(s) \leftrightarrow H_2O(g)$	Penguapan air
2	$Fe(s) \rightarrow Fe(hm)$	Pencairan besi pada ore, sinter, pelet
3	$Fe_wO(s) \rightarrow Fe_wO(slag)$	Pencairan wustit pada ore, sinter, pelet
4	$SiO_2(i) \rightarrow SiO_2(slag)$	Pencairan silika pada ore, sinter, pelet
5	$Al_2O_3(i) \rightarrow Al_2O_3(slag)$	Pencairan alumina pada ore, sinter, pelet
6	$CaO(i) \rightarrow CaO(slag)$	Pencairan lime pada ore, sinter, pelet
7	$MgO(i) \rightarrow MgO(slag)$	Pencairan magnesita pada ore, sinter, pelet
8	$Scrap \rightarrow Fe(hm) + C(hm) + Si(hm)$	Pencairan scrap
9	$C(i) \rightarrow C(hm)$	Dissolution karbon pada ore, sinter, pellet, arang



2.4 Pemodelan *blast furnace*

- **Aliran Fase Gas**

Persamaan Ergun digunakan untuk menghitung dan memprediksi terjadinya *pressure drop* pada *blast furnace*. Persamaan ini telah banyak di observasi dan diterapkan dalam percobaan dan pemodelan seperti yang dilakukan oleh Castro, Austin dan Hayagi pada penelitian mereka. Dengan menggunakan persamaan Ergun distribusi tekanan pada *blast furnace* dapat di hitung dan diprediksi. Selain empirik dari Ergun persamaan Navier-Stokes juga dapat diterapkan untuk menghitung distribusi tekanan pada fluida yang memiliki viskositas (Nagomi, 2006).

- **Aliran Fase Solid**

Untuk pemodelan aliran fase solid dapat menggunakan beberapa metode. *Discrete element method* (DEM) yaitu metode untuk mengkomodir pergerakan kontak partikel. Pada metode ini pergerakan seperti terjadi pada tipe elemen spring (Natsui, 2011). Model lain adalah dengan menggunakan model kinematik, akan tetapi model ini memiliki batasan pada fase solid karena tidak mengkomodir persamaan momentum sehingga model ini hanya mampu mengkalkulasi pada interaksi antar fase. Formulasi lain yang digunakan dalam pemodelan aliran fase solid adalah model *viscos flow*. Model ini memiliki kekurangan untuk memprediksi pergerakan fase solid akan tetapi model ini dapat mengkomodir persamaan momentum dan persamaan kontinuitas antar fase lebih mudah dilakukan. Dengan menggunakan model *viscos flow* maka area deadmen tidak dapat diprediksi sehingga harus menerapkan asumsi dengan menaikkan nilai dari viskositas partikel pada area deadmen. Untuk mengkomodir area deadmen dapat digunakan model teori *hypo-plasticity*. Teori ini berbasis finite element method (FEM) untuk memecahkan persoalan tegangan sehingga di dapatkan laju deformasi.

- **Aliran Fase Cair**

Fase cair pada *blast furnace* berada pada bagian bawah yaitu logam cair dan slag. Keduanya berinteraksi dengan berbagai fase seperti solid, gas dan partikel halus. Sifat dari logam cair dan slag mengalami perubahan seiring dengan



perubahan temperatur dan komposisi kimia akibat terjadinya reaksi kimia pada area kohesif. Untuk pemodelan aliran fase cair dapat digunakan Navier-Stokes. Model ini mengkomidir aliran fase cair pada proses dengan adanya tekanan.

2.5 Analisis Numerik Deposisi Powder Pada *Blast Furnace* Berdasarkan Teori *Multi-Fluid*

Pemodelan pada penelitian ini menggunakan teori multi-fluid dimana semua fase seperti fase cair mengalami interaksi dengan momentum, massa dan energi. Jumlah fase dalam penelitian ini adalah enam. Keenam fase tersebut adalah fase gas, solid (arang, sinter, ore, pellet, scrap), statik powder (SPC) dan statik powder berukuran halus (SFC), logam cair, slag, dinamik powder (DPC) dan dinamik powder berukuran halus (DFC). Ukuran arang yang halus merupakan hasil degradasi dari arang berukuran besar pada *blast furnace*, arang dengan ukuran yang halus ini masuk dalam powder dinamik dimana akan bereaksi dengan fase lain seperti gas dan fase cair serta mengalami transformasi fisik.

Persamaan yang digunakan untuk pemodelan ini terdiri dari persamaan konservatif massa, momentum, energi panas, dan reaksi kimia dari setiap spesies fase yang ada dalam *blast furnace*. Persamaan konservatif secara keseluruhan yang digunakan dalam model ini seperti tertera dalam persamaan 2.9 dibawah ini.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon_i \rho_i u_i \phi_i) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \varepsilon_i \rho_i v_i \phi_i) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi_i} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi_i} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S_{\phi_i} \dots (2.9)$$

Dimana i adalah fase yang ada dalam pemodelan (gas, solid, arang, sinter, pellet, scrap, ore, SPC, SFC, logam cair, slag, DPC dan DFC). Γ_{ϕ_i} adalah koefisien transfer yang nilai bergantung pada variable yang ditentukan. Untuk mempermudah penyelesaian persamaan konservatif maka beberapa asumsi dilakukan diantaranya untuk perhitungan laju alir persamaan konservatif momentum menggunakan asumsi dinamik viskositas, untuk perpindahan panas persamaan konservatif energi menggunakan asumsi konduktifitas termal dan konveksi, untuk transfer massa persamaan konservatif masa komposisi yang



dihitung pada persamaan 2.1 menggunakan asumsi fraksi massa pada setiap komponen yang akan dihitung.

2.5.1 Persamaan Momentum

Perubahan momentum dari fase gas ke fase solid dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Ergun seperti pada persamaan 2.10 (sungging,2006)

$$F_{g-s} = 150\mu_g \left[\frac{1}{|\vec{U}_g - \vec{U}_s|} \left[\frac{\varepsilon_g}{(1-\varepsilon_g)d_g\phi_g} \right]^2 + 1.75\rho_g \left[\frac{\varepsilon_g}{(1-\varepsilon_g)d_s\phi_s} \right] \right] \dots\dots (2.10)$$

Pada bagian atas *blast furnace*, arang dan partikel bijih besi/ore dimasukkan membentuk struktur berlapis lapis di dalam *blast furnace*. Akibatnya pada area kohesif tersusun atas beberapa layer dengan sudut kemiringan θ sehingga secara geometri dihitung secara anisotropik sesuai dengan persamaan 2.11 dibawah ini

$$\vec{F}_g^s = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} R_{perp} & 0 \\ 0 & R_{para} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} |\vec{U}_g - \vec{U}_s| (\vec{U}_g - \vec{U}_s) \dots\dots (2.11)$$

Dimana R_{perp} dan R_{para} adalah koefisien flow dan paralel untuk struktur layer solid pada area kohesif dimana besarnya R_{perp} dan R_{para} adalah (Hiroshi,2006)

$$R_{perp} = \sum_k f_k R_k \text{ dan } \left(\frac{1}{\sqrt{R_{para}}} \right) = \sum_k \left(\frac{f_k}{\sqrt{R_k}} \right) \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana f_k dan R_k adalah

$$R_k = 150 \mu_g \frac{(1-\varepsilon_g)^2}{|\vec{U}_g - \vec{U}_s| \varepsilon_g^3 \phi_s d_s} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_g) \rho_g}{\varepsilon_g^3 \phi_s d_s} \dots\dots\dots (2.13)$$

Untuk momentum dari fase gas ke fase cair dan fase gas ke fase powder dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang digunakan oleh Richardson dan Zaki seperti pada persamaan 2.14



$$\vec{F}_g^i = -C_{d_{g-i}} \left[\frac{3\varepsilon_i \rho_i}{4d_i \varphi_i} \right] |\vec{U}_g - \vec{U}_i| (\vec{U}_g - \vec{U}_i) \dots \dots \dots (2.14)$$

Dengan

$$C_{d_{g-i}} = \left[\frac{24}{\text{Re}_{g-i}} (1 + a \text{Re}_{g-i}^b) + \frac{c}{1 + \frac{d}{\text{Re}_{g-i}}} \left(\frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_g + \varepsilon_i} \right)^{-4,65} \right] \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana i adalah logam cair, slag, powder dan PC. a,b,c,d adalah fungsi bentuk dari partikel (φ) sesuai dengan persamaan (Yagi,2005)

$$\ln(a) = 2,3288 - 6,4581 \varphi_i + 2,448 \varphi_i^2$$

$$b = 0,0964 + 0,5565 \varphi_i$$

$$\ln(c) = 4,905 - 13,8944 \varphi_i + 18,4222 \varphi_i^2 - 10,2599 \varphi_i^3$$

$$\ln(d) = 1,4681 + 12,2584 \varphi_i - 20,7322 \varphi_i^2 + 15,8855 \varphi_i^3$$

Untuk momentum dari fase solid ke fase cair dapat digunakan persamaan yang digunakan oleh Kozeny-Carman dimana fraksi volume fase cair sangat kecil.

$$\vec{F}_s^l = \frac{\rho_l}{r_h} |\vec{U}_l - \vec{U}_s| (5\beta + 0,4\beta^{0,1}) (\vec{U}_l - \vec{U}_s) \dots \dots \dots (2.16)$$

Dan nilai dari β adalah

$$\beta = \frac{\mu_l}{\rho_l |\vec{U}_l - \vec{U}_s| r_h} \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana

$$r_h = \frac{\varepsilon_l \varphi_s d_s}{6\varepsilon_s} \dots \dots \dots (2.18)$$

Untuk fase solid – powder dapat digunakan persamaan yang dikembangkan dari hasil eksperimen yang dilakukan oleh J Yagi dkk .

$$\vec{F}_s^i = \frac{F_k}{2D} \varepsilon_i \rho_i |\vec{U}_i - \vec{U}_s| (\vec{U}_i - \vec{U}_s) \dots \dots \dots (2.19)$$

Nilai D setara dengan



$$D = \frac{2\phi_s d_s}{3\varepsilon_s} (1 - \varepsilon_s) \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana

$$F_k = \frac{10,5}{F_r^{1.33}} \quad \text{untuk } 0,003 < F_r < 0,5 \text{ (vertical) dan}$$

$$F_k = \frac{14,98}{F_r^{1.33}} \quad \text{untuk } 0,003 < F_r < 0,5 \text{ (horizontal)}$$

Besarnya nilai F_r dapat dihitung dengan persamaan

$$F_k = \frac{|\vec{U}_s - \vec{U}_i|}{\sqrt{gD}} \dots\dots\dots (2.21)$$

2.5.2 Persamaan Perpindahan Panas

Dengan asumsi powder statik bergerak bersamaan dengan fase solid maka temperatur powder statik memiliki nilai yang sama dengan fase solid. Oleh karena itu persamaan konservatif dapat diubah menjadi

$$\frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_{sf} \rho_{sf} v_{sf} H_{sf}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_{sf} \rho_{sf} v_{sf} H_{sf}) = \dot{E}_{g,sf} + \dot{E}_{slag,sf} + \dot{E}_{hm,sf} + \sum \dot{E}_{n,sf}$$

Dimana \dot{E} adalah energy yang menyebabkan terjadinya perpindahan panas secara konveksi pada saat fase yang berbeda melakukan kontak. Energi yang menyebabkan terjadinya perpindahan panas secara konveksi dapat dihitung dengan

$$E_i^j = h_{i-j} A_{i-j} [T_i - T_j] \dots\dots\dots (2.22)$$

Nilai koefisien konduksi dihitung dengan menggunakan persamaan Ranz – Marshall yang telah di kembangkan oleh Akiyama untuk pergerakan layer. Nilai koefisien konveksi antar fase dapat dihitung menggunakan persamaan persamaan di bawah ini.

- Fase gas - solid

$$h_{g-s} = \frac{k_g}{d_s} [2 + 0,39(\text{Re}_{g-s})^{1/2} (\text{Pr}_g)^{1/3}] \dots\dots\dots (2.23)$$

- Fase gas – cair (di gunakan oleh Mackey dan Warner)



$$h_{g-l} = 4,18 \times 10^{-4} (\varepsilon_g \rho_g u_g) C p_g (\varepsilon_l u_l)^{0,35} (\text{Re}_g)^{-0,37} (\text{Sc}_g / \text{Pr}_g)^{2/3}$$

- Fase solid – cair

$$h_{l-s} = \frac{k_1}{d_s} \left(\frac{2\sqrt{\text{Re Pr}}}{1,55\sqrt{\text{Pr}} + 3,09\sqrt{0,372 - 0,15\text{Pr}}} \right) \dots\dots\dots (2.24)$$

- Fase solid-powder

$$h_{eff} = 2 \sqrt{\frac{k_{eff} (C p_s \rho_s)_{eff}}{\pi t_{c,eff}}} \dots\dots\dots (2.25)$$

Dimana

$$t_{c,eff} = \left(\frac{\varepsilon_g - \varepsilon_i}{U_{eff} A_s} \right) \dots\dots\dots (2.26)$$

- Fase gas – powder

$$h_{g-i} = \frac{k_g}{d_i} [2 + 0,6(\text{Re}_{g-i})^{1/2} (\text{Pr}_g)^{1/3}] \dots\dots\dots (2.27)$$

Kontak area merupakan salah satu parameter yang menentukan perpindahan panas secara konveksi. Untuk menghitung luas area kontak material solid dapat menggunakan persamaan.

$$A_s = \sum_m f_m \frac{6\varepsilon_m}{d_m \phi_m} \dots\dots\dots (2.28)$$

Untuk area solid – cair (slag dan logam cair) perhitungan luas area dapat menggunakan persamaan yang digunakan oleh Niu

$$\frac{A_{s-i}}{A_s} = 0,4 \text{Re}_{s-i}^{0,218} \text{We}_{s-i}^{0,0428} \text{Fr}_i^{-0,0238} [1 + \cos \theta_{s-i}]^{-0,0235} \dots\dots\dots (2.29)$$

Dimana



$$A_{s-i} = \left[\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_g + \sum_i \varepsilon_i} \right] \left[A_s - \sum_l A_{s-l} \right] \dots\dots\dots (2.30)$$

2.5.3 Persamaan Pergerakan Powder Statik

Powder statik adalah partikel dari arang berukuran kecil yang tidak terbakar akan mengalir bersama dengan aliran fase gas, bergerak masuk melalui celah celah yang ada pada susunan layer fase solid. Walaupun berupa statik powder akan tetapi fase ini tetap dapat terpisah dan bergabung dengan gas sehingga menjadi dinamik. Secara umum pergerakan powder statik ke bagian atas dari *blast furnace* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan konservatif seperti pada persamaan 2.31 di bawah ini.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_{fs} \rho_{sf} v_{fs} u_{fs}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_{fs} \rho_{sf} v_{fs}) = R_f \dots\dots\dots (2.31)$$

Dimana R_f adalah laju reaksi dari powder. Laju reaksi ini oleh Hideka diselsaikan dengan menggunakan perbedaan antara laju pergerakan powder dan laju masuk dari powder.

$$R_f = r_s - r_d = \rho_f (k_f a \varepsilon_f - k_r a \varepsilon_{fs}) \dots\dots\dots (2.32)$$

Dimana

$$k_f \alpha = \frac{1}{400} \left(1 + \left(\frac{G_g}{G_f} \right)^{-3} \right) d_f^{1/2} \dots\dots\dots (2.33)$$

$$k_r a = k_f a (\varepsilon_{fo} / \varepsilon_{fso}) \dots\dots\dots (2.34)$$

Perhitungan pergerakan ke atas powder dinamik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$\varepsilon_{fo} = \frac{1}{\rho_f} \left(\frac{G_f}{G_f + G_g} \right)^{1.25} \left[200 \exp \left\{ -1.25 (u_g - u_z) / \left(\frac{G_f}{G_f + G_g} \right) \right\} + 480 d_f^{1/3} \right] \dots\dots\dots (2.35)$$

Dengan nilai



$$G_f = \rho_f u_f \varepsilon_f; G = \rho_g u_g \varepsilon_g; u_z = 0.275 \left(\frac{\rho_g d_f v_{ff}}{\mu_g} \right)^{0.15} \dots\dots\dots (2.36)$$

Perhitungan pergerakan ke atas powder statik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\varepsilon_{fso} = 0.007 (\varepsilon_g u_g)^{-1.5} G_f^{0.2} \dots\dots\dots (2.37)$$

Dari persamaam 2.23 terdapat penambahan massa yang menyebabkan terjadinya reaksi kimia sehingga laju reaksi powder statik harus di tambahkan pada persamaan 2.23 sehingga persamaan menjadi

$$\frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_{sf} \rho_{sf} u_s) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \varepsilon_{sf} \rho_{sf} v_s) = R_{chem} + R_f \dots\dots\dots (2.38)$$

R_{chem} adalah laju reaksi pada powder statik.

$$R_{chem} = S_{C,sf} + S_{SiO_2,sf} + S_{Al_2O_3,sf} + S_{CaO,sf} + S_{MgO,sf}$$

2.5.4 Persamaan Material Propertis pada Blast Furnace

- Sifat Fase gas

Berat jenis dari fase gas dihitung menggunakan hukum gas ideal.

$$\rho_g = \frac{P_g}{RT_g} \sum \omega_{j,g} M_j \dots\dots\dots (2.39)$$

Dimana j adalah spesies dari gas. Viskositas dari spesies kimia gas dihitung dengan menggunakan teori *statistical mechanical* seperti pada persamaan 2.40 di bawah ini.

$$\mu_g = 2.6693 \times 10^{-6} \frac{1}{\Omega_{\mu,j}} \sqrt{\frac{M_j T_g}{\sigma_j}} \dots\dots\dots (2.40)$$

Dengan

$$\Omega_{\mu,j} = \frac{1.16145}{(T^*)^{0.14874}} + \frac{0.52487}{\exp(0.77320T^*)} + \frac{2.16178}{\exp(2.43787T^*)} \dots\dots\dots (2.41)$$

$$T^* = \frac{k_{Boltzmann} T_g}{\epsilon_j} \dots\dots\dots (2.42)$$



Untuk konduktivitas termal pada gas dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan Eucken's polyatomik .

$$k_j = M_j \left(C_{p,j} + \frac{5R}{4M_j} \right) \dots\dots\dots (2.43)$$

Pada persamaan 2.44 digunakan untuk menghitung nilai entalpi dan *specific heat* pada fase gas.

$$H_g = \sum_{j \in g} \omega_{j,g} \left[\Delta H_{j,g}^{298K} + \int_{298K}^{T_g} C_{p,j}(T) dT \right] \dots\dots\dots (2.44)$$

Dengan

$$C_{p,j}(T) = a_j + b_j T + c_j T^{-2} \dots\dots\dots (2.45)$$

Koeffisien transfer untuk persamaan menghitung entalpi di hitung dengan persamaan 2.46.

$$\Gamma_{H_g,z} = \frac{\Delta W k_{g,1}^* + \Delta V k_{g,2}^*}{\sqrt{\Delta W^2 + \Delta V^2}} ; \Gamma_{H_g,r} = \frac{\Delta W k_{g,2}^* + \Delta V k_{g,1}^*}{\sqrt{\Delta W^2 + \Delta V^2}} \quad (2.46)$$

dimana ΔW dan ΔV adalah perbedaan kecepatan antara fase gas dan fase solid pada orientasi vertikal dan horisontal.

- **Sifat Fase Solid**

Sifat pada fase solid dihitung berdasarkan komposisi dan sifat komponen penyusun dari fase solid itu sendiri. *Specific heat* dari komponen penyusun fase solid dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$C_{p,k} = a_k + b_k T_s + \frac{c_k}{T_s^2} \qquad C_{p,s} = \sum_{k \in s} C_{p,k} \omega_{k,s} \quad (2.47)$$

Untuk perhitungan sifat entalpi dari fase solid menggunakan persamaan 2.48.

$$H_s = \sum_{k \in s} \omega_k \left[\Delta H_k^{298K} + \int_{298K}^{T_s} C_{p,k}(T) dT \right] \dots\dots\dots (2.48)$$



Konduktivitas termal fase solid pada tiap layer untuk perhitungan perpindahan panas dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$k_{s,\text{eff}} = (1 - \varepsilon_s)(k_g + a) + \varepsilon_s \left[\frac{2}{3k_s} + \left(\frac{k_g}{0.274} + b \right)^{-1} \right]^{-1} \dots\dots\dots (2.49)$$

Dimana

$$a = \alpha \left[1 + \left(\frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_s} \right) \left(\frac{1 - e_s}{2e_s} \right) \right]^{-1} \dots\dots\dots (2.50)$$

$$b = \alpha \left(\frac{e_s}{2 - e_s} \right) \dots\dots\dots (2.51)$$

$$\alpha = 0.1952 d_s \left(\frac{T_s}{100} \right)^3 \left(\frac{4.184}{3600} \right) \dots\dots\dots (2.52)$$

- **Sifat logam cair**

Berat jenis, viskositas dan konduktivitas termal dari logam cair bergantung dari temperatur. Perubahan temperatur akan membuat nilai sifat sifat tersebut menjadi berubah (Yagi, 2000)

$$k_{\text{hm}} = 0.0158 T_{\text{hm}} \dots\dots\dots (2.53)$$

$$\mu_{\text{hm}} = 0.0967 \times 10^{-3} \exp \left(\frac{58.9 \times 10^3}{8.314 T_{\text{hm}}} \right) \dots\dots\dots (2.54)$$

2.6 Kinematika rekasi dan transport masa

Pemodelan yang dilakukan juga mengakomodir transport massa dari fase solid ke fase powder. Pada sub bab ini reaksi kimia dan laju reaksi di tampilkan dalam bentuk tabel. Reduksi oksida besi terjadi secara langsung dan tak langsung dengan melibatkan reduktan masing masing untuk setiap reduksi. Reduksi tidak langsung oksida besi membutuhkan reduktan gas karbon monoksida atau gas hidrogen. Sedangkan reduksi langsung oksida besi membutuhkan reduktan karbon.



Reduksi oksida besi secara tidak langsung oleh CO

1 _i	$\text{Fe}_2\text{O}_3(i) + \text{CO}(g) \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4(i) + \text{CO}_2(g)$	<i>i = ore, sinter, pellet, ore yang halus</i>
2 _i	$\frac{w}{4w-3} \text{Fe}_3\text{O}_4(i) + \text{CO}(g) \rightarrow \frac{3}{4w-3} \text{Fe}_w\text{O}(i) + \text{CO}_2(g)$	<i>i = ore, sinter, pellet, ore yang halus</i>
3 _i	$\text{Fe}_w\text{O}(i) + \text{CO}(g) \rightarrow w\text{Fe}(i) + \text{CO}_2(g)$	<i>i = ore, sinter, pellet, ore yang halus</i>
$R_{n_i} = A_i \frac{\rho_g}{W} \sum_{m=1,3} \alpha_{n_i,m} \left(K_m \frac{\omega_{\text{CO}}}{M_{\text{CO}}} - \frac{\omega_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} \right)$		

$$\alpha_{1,1} = a_3(a_2 + b_2 + b_3^*) + b_3^*(a_2 + b_2); \alpha_{1,2} = \alpha_{2,1} = -a_3(b_2 + b_3^*) - b_2b_3^*$$

$$\alpha_{2,2} = (a_1 + b_1 + b_2)(a_3 + b_3^*) + a_3b_3^*; \alpha_{2,3} = \alpha_{3,2} = -(a_1 + b_1)b_3^*$$

$$\alpha_{3,3} = (a_1 + b_1)(a_2 + b_2 + b_3^*) + a_2(b_2 + b_3^*); \alpha_{3,1} = \alpha_{1,3} = -a_2b_3^*$$

$$W = \alpha_{1,1}(a_1 + b_1) - \alpha_{1,2}a_2; A_i = \frac{6\varepsilon_i}{d_i\phi_i}$$

$$a_1 = \frac{1}{x_1^2} \frac{1}{k_1(1+1/k_1)}; a_2 = \frac{1}{x_2^2} \frac{1}{k_2(1+1/k_2)}; a_3 = \frac{1}{x_3^2} \frac{1}{k_3(1+1/k_3)}$$

$$b_1 = \frac{(x_2 - x_1)}{x_2x_1} \frac{d_i}{2D_1}; b_2 = \frac{(x_3 - x_2)}{x_3x_2} \frac{d_i}{2D_2}; b_3 = \frac{(x_4 - x_3)}{x_4x_3} \frac{d_i}{2D_1}; b_3^* = b_3 + \frac{1}{k_{\text{film,CO}_2}}$$

$$x_1 = \frac{d_{\text{Fe}_2\text{O}_3,i}}{d_i}; x_2 = \frac{d_{\text{Fe}_3\text{O}_4,i}}{d_i}; x_3 = \frac{d_{\text{Fe}_w\text{O}_i}}{d_i}; x_4 = 1$$

$$K_1 = \exp\left(7.255 + \frac{3720}{T_i}\right); k_1 = 10^{-2} \exp\left(3.16 - \frac{50.2}{8.3146 \times 10^{-3} T_i}\right);$$

$$D_1 = 10^{-4} \exp\left(8.76 - \frac{14100}{T_i}\right);$$

$$K_2 = \exp\left(5.289 - \frac{4711}{T_i}\right);$$

$$k_2 = 10^{-2} \exp\left(2.09 - \frac{40}{8.3146 \times 10^{-3} T_i}\right); D_2 = 10^{-4} \exp\left(2.77 - \frac{7200}{T_i}\right)$$



$$K_3 = \exp\left(-3.127 + \frac{2879}{T_i}\right); k_3 = 10^{-2} \exp\left(5.42 - \frac{61.4}{8.3146 \times 10^{-3} T_i}\right);$$

$$D_3 = 10^{-4} \exp\left(5.09 - \frac{8800}{T_i}\right)$$

$$k_{\text{film, CO}_2} = D_{\text{CO}_2, \text{N}_2}^{T_{\text{ave}}} \frac{Sh_i}{d_i}; Sh_i = 2 + 0.39 Re_i^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\rho_g D_{\text{CO}_2, \text{N}_2}^{T_{\text{ave}}}} \right)^{1/3}; T_{\text{ave}} = \frac{T_g + T_i}{2}$$

$$\frac{d_{\text{Fe}_2\text{O}_3(i)}}{d_i} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{2\omega_{\text{Fe}_2\text{O}_3(i)}}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} \right)^{1/3}; \frac{d_{\text{Fe}_3\text{O}_4(i)}}{d_i} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{2\omega_{\text{Fe}_2\text{O}_3(i)}}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} + \frac{3\omega_{\text{Fe}_3\text{O}_4(i)}}{M_{\text{Fe}_3\text{O}_4}} \right)^{1/3}$$

$$\frac{d_{\text{Fe}_w\text{O}(i)}}{d_i} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{2\omega_{\text{Fe}_2\text{O}_3(i)}}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} + \frac{3\omega_{\text{Fe}_3\text{O}_4(i)}}{M_{\text{Fe}_3\text{O}_4}} + \frac{w\omega_{\text{Fe}_w\text{O}(i)}}{M_{\text{Fe}_w\text{O}}} \right)^{1/3}$$

$$\sigma^3 = \frac{2\omega_{\text{Fe}_2\text{O}_3(i)}}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} + \frac{3\omega_{\text{Fe}_3\text{O}_4(i)}}{M_{\text{Fe}_3\text{O}_4}} + \frac{w\omega_{\text{Fe}_w\text{O}(i)}}{M_{\text{Fe}_w\text{O}}} + \frac{1}{\rho_i \varepsilon_i} \left(\rho_{\text{slg}} \varepsilon_{\text{slg}} \frac{w\omega_{\text{Fe}_w\text{O}(\text{slg})}}{M_{\text{Fe}_w\text{O}}} + \rho_{\text{hm}} \varepsilon_{\text{hm}} \frac{\omega_{\text{Fe}(\text{hm})}}{M_{\text{Fe}}} \right)$$

Reduksi oksida besi secara tidak langsung oleh gas hidrogen (H₂)

4 _i	$\text{Fe}_2\text{O}_3(i) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4(i) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	<i>i = ore, sinter, pellet</i> <i>, ore yang halus</i>
5 _i	$\frac{w}{4w-3} \text{Fe}_3\text{O}_4(i) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \frac{3}{4w-3} \text{Fe}_w\text{O}(i) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	<i>i = ore, sinter, pellet</i> <i>, ore yang halus</i>
6 _i	$\text{Fe}_w\text{O}(i) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow w\text{Fe}(i) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	<i>i = ore, sinter, pellet</i> <i>, ore yang halus</i>
$R_{n_i} = A_i \frac{\rho_g}{W} \sum_{m=1,3} \alpha_{n_i, m} \left(K_m \frac{\omega_{\text{H}_2}}{M_{\text{H}_2}} - \frac{\omega_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \right)$		

Koeffisien reaksi reduksi secara tidak langsung oleh gas hidrogen dihitung menggunakan persamaan yang sama untuk perhitungan koeffisien pada karbon monoksida seperti di atas.



$$K_4 = \exp\left(10.32 + \frac{362}{T_i}\right); k_4 = 10^{-2} \exp\left(4.49 - \frac{33.4}{8.3146 \times 10^{-3} T_i}\right);$$

$$D_4 = 10^{-4} \exp\left(3.43 - \frac{4200}{T_i}\right)$$

$$K_5 = \exp\left(8.98 - \frac{8580}{T_i}\right);$$

$$k_5 = 10^{-2} \exp\left(6.70 - \frac{58.2}{8.3146 \times 10^{-3} T_i}\right); D_5 = 10^{-4} \exp\left(5.64 - \frac{6800}{T_i}\right)$$

$$K_6 = \exp\left(1.30 - \frac{2070}{T_i}\right); k_6 = 10^{-2} \exp\left(6.97 - \frac{57.1}{8.3146 \times 10^{-3} T_i}\right);$$

$$D_6 = 10^{-4} \exp\left(4.77 - \frac{5900}{T_i}\right)$$

$$k_{\text{film, H}_2\text{O}} = D_{\text{H}_2\text{O, N}_2}^{T_{\text{ave}}} \frac{Sh_i}{d_i}; Sh_i = 2 + 0.39 Re_i^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\rho_g D_{\text{H}_2\text{O, N}_2}^{T_{\text{ave}}}} \right)^{1/3}; T_{\text{ave}} = \frac{T_g + T_i}{2}$$

Reduksi langsung oksida besi membutuhkan reduktan karbon dari kokas dan arang.

Reduksi oksida besi langsung oleh karbon

7_i	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{slg}) + \text{C}(i) \rightarrow \text{Fe}(\text{hm}) + \text{CO}(\text{g})$	$i = \text{ore, sinter, pellet, ore yang halus}$
$R_{7_i} = k_{7_i} \left(\frac{\rho_{\text{slg}} \varepsilon_{\text{slg}} \omega_{\text{FeOslg}}}{M_{\text{FeO}}} \right)^2 (0.078 A_i); A_i = \frac{6\varepsilon_i}{d_i \varphi_i}; k_{7_i} = \frac{4.66 \times 10^4}{3600} \exp\left(\frac{-53300}{82.056 T_{\text{min}}} \right)$ $T_{\text{min}} = \min(T_i, T_{\text{slg}})$		

Pada area pembakaran terjadi reaksi oksidasi karbon dari arang dan batu bara menjadi CO atau CO₂.



Pembakaran

8_i	$C(i) + \frac{1}{2} O_2(g) \rightarrow CO(g)$ (partial)	$i = \text{coke, pc, fine coke}$
9_i	$C(i) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$ (full)	$i = \text{coke, pc, fine coke}$
$R_{8_i} = \frac{a}{1+a} R_{ave} \text{ and } R_{9_i} = \frac{1}{1+a} R_{ave} ; R_{ave} = \left(\frac{\varepsilon_g \rho_g \omega_{O_2(g)}}{M_{O_2}} \right) \left\{ \frac{d_i \varphi_i}{A_i D_{O_2, N_2}^{T_{ave}} Sh_i} + \frac{1}{\eta k_{ave}} \right\}^{-1}$		

$$a = 2500 \exp\left(-\frac{12400}{1.987T_i}\right); \quad k_{ave} = 7260 RT_g \exp\left(-\frac{17980}{T_{ave}}\right); \quad T_{ave} = \frac{T_g + T_i}{2};$$

$$A_i = \frac{6\varepsilon_i}{d_i \varphi_i} \quad \eta = \left[\frac{d_i}{6} \sqrt{\frac{k_{ave} \delta_i}{\zeta_i D_{O_2, N_2}^{T_{ave}}}} \right]^{-1} \left\{ \left[\tanh\left(\frac{d_i}{6} \sqrt{\frac{k_{ave} \delta_i}{\zeta_i D_{O_2, N_2}^{T_{ave}}}} \right) \right]^{-1} - \left[\frac{d_i}{2} \sqrt{\frac{k_{ave} \delta_i}{\zeta_i D_{O_2, N_2}^{T_{ave}}}} \right]^{-1} \right\};$$

$$\delta_{coke} = 1; \delta_{pc} = 1; \zeta_{pc} = 0.2$$

Karbon dioksida dibutuhkan pada reaksi *solution loss* dan reaksi dengan uap air menjadi gas karbon monoksida pada temperatur. Laju reaksi pada kedua reaksi ini dihitung menggunakan *mixed diffusion* dan *kinetic control*.

Solution loss

10	$C(i) + CO_2(g) \rightarrow 2CO(g)$	$i = \text{coke, pc, fine coke}$
$R_{10_i} = \frac{\rho_g \omega_{CO_2(g)}}{M_{CO_2}} \left(\frac{1}{A_i k_{film, CO_2}} + \frac{1}{\eta k_{10_i}} \right)^{-1}$		

$$k_{10_i} = \frac{k_1}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2}} \rho_i \varepsilon_i \omega_i 82.056 \times 10^{-3} T_g;$$

$$k_1 = \frac{1}{60} \exp\left(19.875 - \frac{66350}{1.987T_i}\right); \quad k_2 = \exp\left(-6.688 + \frac{21421}{1.987T_i}\right);$$

$$k_3 = \exp\left(31.615 - \frac{88168}{1.987T_i}\right)$$

$$P_{\omega_j} = \frac{82.056 \times 10^{-3} \rho_g T_g \omega_j}{M_{\omega_j}}; (j=CO, CO_2); \quad k_{film, CO_2} = D_{CO_2, N_2}^{T_{ave}} \frac{Sh_i}{d_i \varphi_i}; \quad A_i = \frac{6\varepsilon_i}{d_i \varphi_i}$$



$$\eta = \left[\frac{d_i}{6} \sqrt{\frac{k_{10_i} \delta_i}{\zeta_i D_{O_2, N_2}^{T_{ave}}}} \right]^{-1} \left\{ \left[\tanh \left(\frac{d_i}{6} \sqrt{\frac{k_{10_i} \delta_i}{\zeta_i D_{O_2, N_2}^{T_{ave}}}} \right) \right]^{-1} - \left[\frac{d_i}{2} \sqrt{\frac{k_{10_i} \delta_i}{\zeta_i D_{O_2, N_2}^{T_{ave}}}} \right]^{-1} \right\};$$

$$T_{ave} = \frac{T_g + T_i}{2}$$

$$\delta_{coke} = 1; \delta_{pc} = 1; \zeta_{pc} = 0.2$$

Reaksi uap air dengan karbon

11	$C(i) + H_2O(g) \rightarrow CO(g) + H_2(g)$	$i = \text{coke, pc, fine coke}$
$R_{11_i} = \frac{\rho_g \omega_{H_2O_g}}{M_{H_2O}} \left[\frac{1}{A_i k_{film, H_2O}} + \frac{1}{\eta k_{11}} \right]$		

$$k_{11} = \frac{k_4}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2} + k_5 P_{H_2O}} \omega_{C(i)} \rho_i \varepsilon_i 82.056 \times 10^{-3} T_g;$$

$$k_{film, H_2O} = D_{H_2O, N_2}^{T_{ave}} \frac{Sh_i}{d_i}$$

$$Sh_i = 1.5 Re_g^{0.55}; k_2 = 10.3 \frac{M_{H_2O}}{M_{CO}}; k_3 = \frac{M_{H_2O}}{M_{CO_2}} \exp \left(14.24 - \frac{18350}{T_i} \right); A_i = \frac{6 \varepsilon_i}{d_i \phi_i}$$

$$k_4 = \frac{1}{3600 M_C} \exp \left(22.35 - \frac{26320}{T_i} \right); k_5 = \exp \left(29.59 - \frac{36760}{T_i} \right)$$

$$\eta = \left[\frac{d_i}{6} \sqrt{\frac{k_{10_i} \delta_i}{\zeta_i D_{H_2O, N_2}^{T_{ave}}}} \right]^{-1} \left\{ \left[\tanh \left(\frac{d_i}{6} \sqrt{\frac{k_{10_i} \delta_i}{\zeta_i D_{H_2O, N_2}^{T_{ave}}}} \right) \right]^{-1} - \left[\frac{d_i}{2} \sqrt{\frac{k_{10_i} \delta_i}{\zeta_i D_{H_2O, N_2}^{T_{ave}}}} \right]^{-1} \right\}$$

$$\delta_{coke} = 1; \delta_{pc} = 1; \zeta_{pc} = 0.2; P_{\omega_j} = \frac{82.056 \times 10^{-3} \rho_g T_g \omega_j}{M_{\omega_j}}$$

Reaksi Shift uap air

12	$CO_2(g) + H_2(g) \leftrightarrow CO(g) + H_2O(g)$
$R_{12} = \frac{1000}{(101325)^2} \varepsilon_s (f_{ore} + f_{sinter} + f_{pellets}) k_{12} \left(P_{CO} P_{H_2O} - \frac{P_{CO_2} P_{H_2}}{K_{12}} \right)$	



$$P_{\omega_j} = \frac{82.056 \times 10^{-3} \rho_g T_g \omega_j}{M_{\omega_j}}; K_{12} = \exp\left(-3.5414 + \frac{3863.7}{T_i}\right)$$

$$k_{12} = \alpha k_1 + (1 - \alpha) k_3 \quad \text{for} \quad \left(P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2\text{O}} - \frac{P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2}}{K_{12}}\right) \geq 0$$

Dengan

$$k_{12} = [\alpha k_2 + (1 - \alpha) k_4] K_{12} \quad \text{for} \quad \left(P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2\text{O}} - \frac{P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2}}{K_{12}}\right) < 0$$

$$k_1 = 93.3 \exp\left(\frac{-7.32}{8.3146 \times 10^{-3} T_g}\right); k_2 = 136 \exp\left(\frac{-7.75}{8.3146 \times 10^{-3} T_g}\right)$$

$$k_3 = 1.83 \times 10^{-5} \exp\left(\frac{7.84 \times 10^{-3}}{8.3146 \times 10^{-3} T_g}\right);$$

$$k_3 = 8.83 \times 10^{-2} \exp\left(\frac{4.56}{8.3146 \times 10^{-3} T_g}\right)$$

Gas oksiden dan karbon dioksida diperlukan dalam pembakaran volatile pada batu bara dimana reaksi pembakaran volatile bergantung pada komposisi volatil.

Pembakaran Volatiles

13	$\text{volatiles (pc)} + \alpha_1 \text{O}_2 \rightarrow \alpha_2 \text{CO}_2(\text{g}) + \alpha_3 \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \alpha_4 \text{N}_2(\text{g})$
$R_{13} = 23.6 \left(\frac{\mu_g \varepsilon_t}{\rho_g k_t}\right)^{1/4} \left(\frac{\varepsilon_t}{k_t}\right) \min\left(\varepsilon_{\text{pc}} \rho_{\text{pc}} \omega_{\text{VMpc}}, \varepsilon_g \rho_g \omega_{\text{O}_2} \frac{M_{\text{VM}}}{\alpha_1 M_{\text{O}_2}}\right)$	
14	$\text{volatiles(pc)} + \alpha_5 \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \alpha_6 \text{CO}(\text{g}) + \alpha_7 \text{H}_2(\text{g}) + \alpha_8 \text{N}_2(\text{g})$
$R_{14} = 23.6 \left(\frac{\mu_g \varepsilon_t}{\rho_g k_t}\right)^{1/4} \left(\frac{\varepsilon_t}{k_t}\right) \min\left(\varepsilon_{\text{pc}} \rho_{\text{pc}} \omega_{\text{VMpc}}, \varepsilon_g \rho_g \omega_{\text{CO}_2} \frac{M_{\text{VM}}}{\alpha_5 M_{\text{CO}_2}}\right)$	

$$k_t = \left(0.03 |\vec{U}_g|\right)^2; \varepsilon_t = \frac{k_t^{0.5}}{0.01}$$

Secara stokiometri reaksi 13 dan reaksi 14 dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini:



$$\delta = \frac{\omega_{C_{VM}}}{M_C} + \frac{\omega_{H_{VM}}}{M_H} + \frac{\omega_{O_{VM}}}{M_O} + \frac{\omega_{N_{VM}}}{M_N}; \alpha_1 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C} + \frac{\omega_{H_{VM}}}{4\delta M_H} - \frac{\omega_{O_{VM}}}{2\delta M_O}$$

$$\alpha_2 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C}; \alpha_3 = \frac{\omega_{H_{VM}}}{4\delta M_H}; \alpha_4 = \frac{\omega_{O_{VM}}}{2\delta M_O}$$

$$\alpha_5 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C} - \frac{\omega_{O_{VM}}}{2\delta M_O}; \alpha_6 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C} + \alpha_5; \alpha_7 = \frac{\omega_{H_{VM}}}{\delta M_H}; \alpha_8 = \frac{\omega_{N_{VM}}}{2\delta M_N}$$

Pada reaksi reduksi silika pada kokas untuk membentuk gas SiO dan Gas CO (gasifikasi silika) dan SiC laju reaksi dihitung sesuai persamaan seperti dibawah.

Reduksi silika pada kokas

15	$\text{SiO}_2(\text{coke}) + \text{C}(\text{coke}) \leftrightarrow \text{SiO}(\text{g}) + \text{CO}(\text{g})$
$R_{15} = k_{15} \rho_{\text{coke}} \left\langle \frac{2273 - T_s}{200} \right\rangle_0^1 \left(\frac{\omega_{\text{SiO}_2(\text{coke})} - P_{\text{CO}} P_{\text{CO}_2} / K_{15}}{M_{\text{SiO}_2}} \right)$	

$$k_{15} = 2 \times 10^4 \exp \left(\frac{-2.89 \times 10^5}{8.314 T_s} \right); K_{15} = \exp \left(17.957 - \frac{35896}{T_s} \right)$$

16	$\text{SiO}_2(\text{coke}) + 3\text{C}(\text{coke}) \leftrightarrow \text{SiC}(\text{coke}) + 2\text{CO}(\text{g})$
$R_{16} = k_{16} \rho_{\text{coke}} \left\langle \frac{2273 - T_s}{200} \right\rangle_0^1 \left(\frac{\omega_{\text{SiO}_2(\text{coke})} - \omega_{\text{SiC}} P_{\text{CO}}^2 / K_{16}}{M_{\text{SiO}_2}} \right)$	

$$k_{16} = 2.7 \times 10^4 \exp \left(\frac{-2.76 \times 10^5}{8.314 T_s} \right); K_{16} = \exp \left(17.760 - \frac{31600}{T_s} \right)$$

17	$\text{SiC}(\text{coke}) + \text{CO}(\text{g}) \leftrightarrow \text{SiO}(\text{g}) + 2\text{C}(\text{coke})$
$R_{17} = k_{17} \rho_{\text{coke}} A_{\text{coke}} \left(\frac{\omega_{\text{SiC}}}{M_{\text{SiC}}} \right); A_{\text{coke}} = \frac{6\varepsilon_{\text{coke}}}{d_{\text{coke}} \phi_{\text{coke}}}; k_{17} = 1.91 \times 10^6 \exp \left(\frac{-379000}{8.314 T_s} \right)$	

Logam cair /slag

18	$\text{SiO}_2(\text{slg}) + \text{C}(\text{coke}) \rightarrow \text{SiO}(\text{g}) + \text{CO}(\text{g})$
19	$\text{SiO}(\text{g}) + \text{C}(\text{hm}) \rightarrow \text{Si}(\text{hm}) + \text{CO}(\text{g})$



$$R_{18} = k_{18} A_{\text{coke,slg}} a_{\text{SiO}_2(\text{slg})} ; R_{19} = k_{\text{film,SiO}} A_{\text{coke,metal}} \rho_{\text{coke}} \frac{\omega_{\text{SiO}}}{M_{\text{SiO}}}$$

$$k_{18} = \max \left[9 \times 10^4 \exp \left(\frac{-3.6 \times 10^5}{8.314 T_{\text{slg}}} \right), 2.3 \times 10^{15} \exp \left(\frac{-7.53 \times 10^5}{8.314 T_{\text{slg}}} \right) \right]$$

$$k_{\text{film,SiO}} = D_{\text{SiO,N}_2}^{T_{\text{ave}}} \frac{Sh_{\text{hm}}}{d_{\text{hm}}} ; Sh_{\text{hm}} = 2 + 0.39 Re_{\text{hm}}^{0.5} \left(\frac{\mu_{\text{g}}}{\rho_{\text{g}} D_{\text{SiO,N}_2}^{T_{\text{ave}}}} \right)^{1/3} ; T_{\text{ave}} = \frac{T_{\text{g}} + T_{\text{hm}}}{2}$$

$$A_{\text{coke},i} = \frac{6\varepsilon_{\text{coke}}}{d_{\text{coke}} \phi_{\text{coke}}} \left[0.4 Re_{\text{coke},i}^{0.218} We_{\text{coke},i}^{0.0238} Fr_i^{-0.0238} (1 + \cos \theta_{\text{coke},i})^{-0.0235} \right]$$

$$\log_{10}(a_{\text{SiO}_2(\text{slg})}) = 0.797 - 9.31 \times 10^{-4} (T_{\text{slg}} - 273.15) - B [0.0228 + 8 \times 10^{-6} (T_{\text{slg}} - 273.15)]$$

$$B = 100 \left[\omega_{\text{CaO}(\text{slg})} + \frac{\omega_{\text{Al}_2\text{O}_3(\text{slg})}}{2} + \frac{\omega_{\text{MgO}(\text{slg})}}{2} - \omega_{\text{SiO}_2(\text{slg})} \right]$$

Sebelum terjadi transformasi fase pertama tama terjadi moisture pada fase solid menguap. Selanjutnya wustite, besi dan semua komponen gangue mencair pada temperatur cairnya. Ketiga terjadi dilusi karbon pada kokas ke dalam logam cair.

Pencairan

20	$\text{Fe}(i) \rightarrow \text{Fe}(\text{hm})$	$i = \text{ore, sinter, pellets}$
21	$\text{Fe}_w\text{O}(i) \rightarrow \text{Fe}_w\text{O}(\text{slg})$	$i = \text{ore, sinter, pellets}$
22	$\text{SiO}_2(i) \rightarrow \text{SiO}_2(\text{slg})$	$i = \text{ore, sinter, pellets}$
23	$\text{Al}_2\text{O}_3(i) \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3(\text{slg})$	$i = \text{ore, sinter, pellets}$
24	$\text{CaO}(i) \rightarrow \text{CaO}(\text{slg})$	$i = \text{ore, sinter, pellets}$
25	$\text{MgO}(i) \rightarrow \text{MgO}(\text{slg})$	$i = \text{ore, sinter, pellets}$
26	$\text{Scrap} \rightarrow \text{Fe}(\text{hm}) + \text{C}(\text{hm}) + \text{Si}(\text{hm})$	
27	$\text{Gangue}(i) \rightarrow \text{Gangue}(\text{slg})$	$i = \text{ore, sinter, pellets}$



$$R_{n_i} = \left\langle \frac{T_i - T_{\text{melt}, \phi_j}}{\Delta T_{\phi_j}} \right\rangle_0^1 \frac{\sum_{\text{face}} F^k \phi_j^k}{M_{\phi_j}} \quad \text{dimanae } k \text{ adalah indicator permukaan dari control volume}$$

(k = timur, barat, selatan, utara, bawah, atas)

$$\Delta T_{\phi_j} = \frac{H_{\phi_j, i}^{T_{\text{melt}}} - H_{\phi_j, S}^{T_{\text{melt}}}}{Cp_{\phi_j}^{T_{\text{melt}}}} \quad (i = \text{logam cair atau slag})$$

Dissolusi karbon

28	$\text{C (coke)} \rightarrow \text{C (hm)}$
$R_{36} = \alpha \frac{\varepsilon_{\text{hm}}}{M_C} \left\langle \frac{T_s - T_{\text{melt, Fe}}}{\Delta T_{\text{Fe}}} \right\rangle_0^1 (a_{\text{C}_{\text{aim}}} - a_{\text{C}_{\text{hm}}}) ; a_{\text{C}_{\text{aim}}} = \frac{N_C M_C}{N_C M_C + (1 - N_C) M_{\text{Fe}}}$ $\log_{10} N_C = -0.375 - \frac{560}{\langle T_{\text{hm}} \rangle_{1426}^{2000}} ; \alpha = 50$	

Evaporation

29 _i	$\text{H}_2\text{O}(i) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(g)$	$i = \text{coke, pc, fine coke}$
$R_{37_i} = \left\langle A_i \frac{D_{\text{H}_2\text{O}, \text{N}_2}^{T_{\text{ave}}}}{d_i} Sh_i \left(\frac{\rho_g \omega_{\text{H}_2\text{O}(g)}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} - \frac{P_{\text{H}_2\text{O}, \text{sat}}}{RT_g} \right) \right\rangle_{-\infty}^{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}(i)}}$		



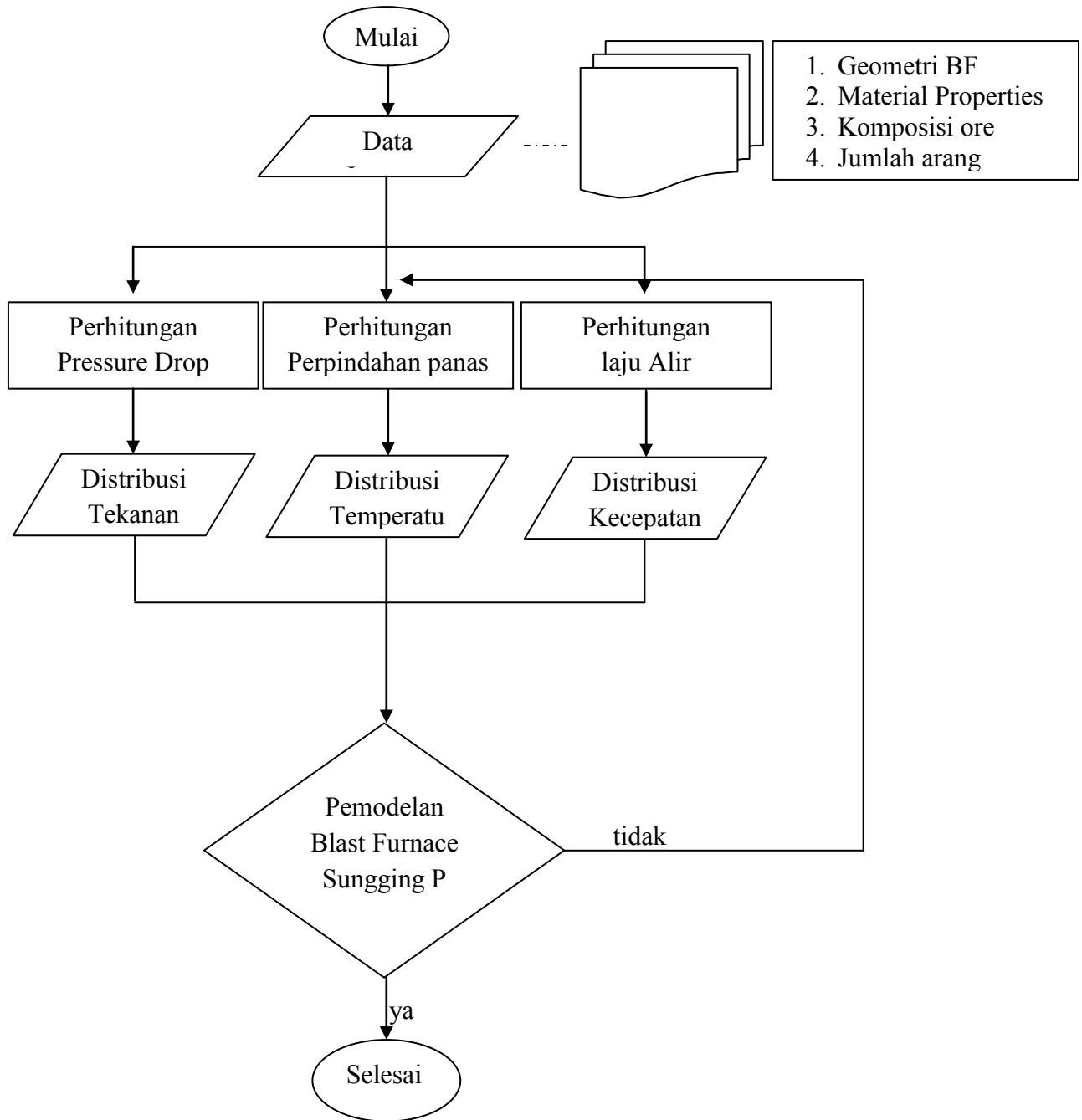
2.7 Teknologi dan Penelitian Terkait pemodelan Blast Furnace Sebelumnya

No	Nama	Tema Penelitian	Jenis Reduktan	Working Volume	Jenis Model	Tahun
1	Sungging P,H. Nogami, J. Yagi	Analisis numerik performa <i>blast furnace</i> karena pengaruh sifat partikel yang ada dalam <i>blast furnace</i>	Kokas	4910 m ³	2D-Steady state	2003
2	H. Nogami, J. Yagi, Mansheng C	Analisis numerik performa <i>blast furnace</i> berbasis teori multi-fluida dengan model transient	Kokas	2303 m ³	2D-Transient	2003
3	G Danloy, J Morgan, R Munnix, G Dauwels	Pemodelan optimasi penggunaan burden pada <i>blast furnace</i>	kokas	3150 m ³	2D-Steady state	2004
4	H. Nogami, Mansheng C , J. Yagi	Analisis numerik performa <i>blast furnace</i> dengan penggunaan CCB berbasis teori multi fluida	Kokas	5775 m ³	2D-Steady state	2004
5	J. Yagi,H. Nogami, Aibing YU	Analisis numerik performa <i>blast furnace</i> berbasis teori multi-fluida untuk menentukan efisiensi produksi	Kokas	4188 m ³	2D-Steady state	2006
6	Yongsong S, Aibing Yu,P Austin, Paul Zulli	Pemodelan pembuatan besi kasar pada <i>blast furnace</i> karena pengaruh injeksi serbuk batu bara dan variasi gas	Kokas dan Batu bara	-	2D-Steady state	2010
7	M Szega, L Blacha, W Stanek	Analisis numerik untuk evaluasi manajemen energi pada pabrik <i>blast furnace</i>	Kokas	-	2D-Steady state	2015



BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Pemodelan



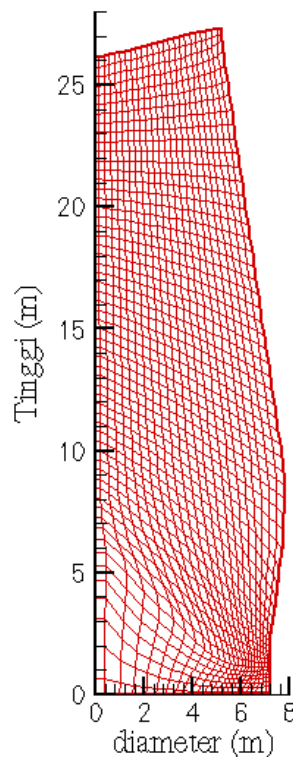
Gambar 3.1 Diagram Alir Pemodelan

3.2 Geometri *blast furnace*



Pada penelitian ini pemodelan performa *blast furnace* dimulai dengan melakukan pengumpulan data dukung seperti geometri *blast furnace*, Komposisi bijih besi yang akan digunakan dalam produksi, material properties dari bahan yang diumpankan ke dalam *blast furnace*, dan kapasitas produksi yang akan digunakan. Pada pemodelan ini volume kerja *blast furnace* yang akan digunakan adalah 3914.1 m³ dengan geometri *blast furnace* dengan spesifikasi geometri sebagai berikut.

1. Tinggi 27,2 m.
2. Diameter dalam 14,2 sampai dengan 15,2 m.
3. Jumlah tuyer 20 buah.
4. Diameter tuyer 11,2 cm.
5. Panjang nose tuyer 10 cm
6. Posisi tuyer 1m di atas lubang tapping slag



Gambar 3.2 Geometri blast furnace

3.3 Komposisi unsur bijih besi



Data selanjutnya yang diperlukan adalah komposisi bijih besi. Pada pemodelan ini digunakan bijih besi yang berasal dari Solok Sumtera Selatan. Bijih besi ini merupakan contoh bijih besi yang dikelola oleh perusahaan tambang PT ARS (Asia Resources Sejahtera). Dengan menggunakan pengujian XRF (*X-Ray Flourescene*) maka dapat diketahui komposisi elemen/unsur pembentuk bijih besi, seperti yang tertera pada table 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1 Komposisi biji besi Solok

No	Parameter	Unit	Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3
1	Besi (Fe)	% Berat	69.23	68.95	69.85
2	SiO	% Berat	4.19	3.8823	4.47
3	Titanium (Ti)	% Berat	0.0668	0.0844	0.0758
4	Aluminium (Al)	% Berat	1.21	1.18	1.14
5	Magnesium (Mg)	% Berat	1.97	1.85	2.02
6	Kalsium (Ca)	% Berat	2.368	2.4328	2.3104
7	Nikel (Ni)	% Berat	0.0343	0.0222	0.0214
8	Mangan (Mn)	% Berat	0.6515	0.6106	0.6664
9	Tembaga (Cu)	% Berat	0.0457	0.0394	0.0489
10	Fosfor (P)	% Berat	0.0456	0.0429	0.0401
11	Seng (Zn)	% Berat	0.1005	0.0988	0.1058

3.4 Material Propertis

Didalam *blast furnace* saat beroperasi terdapat berbagai macam fase dari bahan yang diumpankan. Beberapa fase mengalami perubahan dari fase solid menjadi cair dan gas karena pengaruh temperature dan tekanan operasi. Selain itu juga dikarenakan danya reaksi kimia baik reduksi secara langsung atau reduksi secara tidak langsung. Pada penelitian ini jumlah fase yang di modelkan adalah enam fase dengan spesies kimia dan fase seperti tersaji dalam tabel 3.2.

Tabel 3.2 Fase dan Spesies kimia



Fase	Spesies Kimia (ω_i)	
Gas	CO, CO ₂ , O ₂ , H ₂ , H ₂ O, N ₂ , SiO,	
Solid	ore	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O
	sinter	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O
	pellet	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O
Logam cair	Fe, C, Si	
Slag	FeO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO	
Batu bara dan arang	C, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, volatil	
Fine ore/flux	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂	

Pada Penelitian ini sifat material pada enam fase dalam model akan dihitung dengan menggunakan pendekatan numeric seperti yang tertera pada bab 2.

3.4.1 Sifat Fase Gas

Tabel 3.3. Koeffisien untuk persamaan *Heat Capacity* Fase Gas

Spesies	a_j [kJ/kmol K]	b_j [kJ/kmol K].10 ⁻³	c_j [kJ/kmol K] .10 ⁻⁶
O ₂	25,594	12.251	-4.2050
CO	26.5366	7.683	-1.1719
CO ₂	26.748	42.258	-14.247
H ₂	29.062	-0.82	1.9903
H ₂ O	30.204	9.933	1.117
N ₂	27.016	5.812	-0.289
SiO	33.4176	2.9823	-0.52

(Sumber : Gaskell,R.D 1981)

Tabel 3.4.Panas pembentukan (kcal/kmol)



Spesies (gas)	ΔH_i^{298K}
O ₂	0
CO	-26416
CO ₂	-94052
H ₂	0
H ₂ O	-57798
N ₂	0
SiO	-24200

(Sumber : Gaskell, R.D 1981)

3.4.2 Sifat fase Solid

Sifat pada fase solid dihitung berdasarkan komposisi dan sifat komponen penyusun dari fase solid itu sendiri.

Tabel 3.5 Koeffisien untuk persamaan *Heat Capacity* Fase Solid dan Powder

Spesies	a _j [kcal/kmol K]	b _j [kcal/kmol K ⁻²]	c _j [kcal/kmol K ⁻¹]
Fe ₂ O ₃	24.72	0.01604	-423400
Fe ₃ O ₄	41.17	0.01882	-979500
FewO	12.62	0.00149	-76200
Fe	8.4	0	0
SiO ₂	10.95	0.0055	0
Al ₂ O ₃	22.08	0.00897	-522500
CaO	10	0.00484	-108000
MgO	10.86	0.00119	-208700
C	4.03	0.00114	-204000
SiC	8.89	0.00291	-284000
H ₂ O	18.16	0	0
Volatil	4.03	0.00114	-204000

(Sumber : Castro, 2000)

Tabel 3.6 Panas pembentukan solid (kcal/kmol)



Spesies (i)	ΔH_i^{298K}	Spesies (i)	ΔH_i^{298K}
CaO	-151700	Fe ₂ O ₃	-198500
MgO	-143840	Fe ₃ O ₄	-266900
C	-1000	FeO	-64620
SiC	-28000	Fe	0
H ₂ O	-68317	SiO ₂	-217500
Al ₂ O ₃	-399090		

(Sumber : Castro, 2000)

3.4.3 Sifat slag cair

Berat jenis dan konduktivitas termal slag di asumsikan konstan. Untuk viskositas dari slag tergantung dari komposisi komponen pembentuk slag dan temperatur. Persamaan dibawah ini digunakan untuk menghitung ketiga sifat dari slag saat proses peleburan di *blast furnace*

$$k_{\text{slg}} = 0.57$$

$$\mu_{\text{slg}} = 0.1 \times 10^{p^+}$$

$$\begin{aligned}
 p^+ = & 1.7089 \left(\frac{\omega_{\text{CaO,slg}}}{\omega_{\text{SiO}_2,\text{slg}}} \right)^2 - 4.7419 \left(\frac{\omega_{\text{CaO,slg}}}{\omega_{\text{SiO}_2,\text{slg}}} \right) + 0.9331 (\omega_{\text{MgO,slg}})^2 \\
 & - 0.18862 (\omega_{\text{MgO,slg}}) + 7.99 (\omega_{\text{Al}_2\text{O}_3,\text{slg}})^2 - 1.0317 (\omega_{\text{Al}_2\text{O}_3,\text{slg}}) \\
 & + \frac{4.2687 \times 10^6}{(T_{\text{slg}} - 273.15)^2} + \frac{2.6754 \times 10^3}{T_{\text{slg}} - 273.15} + 0.2575
 \end{aligned}$$

3.3.4 Sifat arang

Faktor bentuk, diameter dan berat jenis di asumsikan konstan dan secara spesifik masuk dalam inputan program. Nilai kalori dari arang juga dimasukkan dalam inputan program. Spesifik heat dan temperatur di hitung sama dengan fase solid.



Tabel 3. 6 Parameter arang pada pemodelan.

Items	Unit	PKS charcoal 5)			Coke 6)	
		Large 3.3 – 8.0 mm	Medium 2.0 – 3.3 mm	Fine 0.1 – 2.0 mm	Lump 1.0 – 15 mm	Breeze 0 – 1.0 mm
Moisture 1)	wt %	7.5	5.9	5.2	13	0.7
Ash	dry wt %	3.2	3.6	13.3	12.1	11.7
Volatile	dry wt %	8.5	8.8	10.9	1.1	1.1
DHV 2)	kcal/kg	7,840	—	6,940	6,650	6,950
(Dried Heating Value	kJ/kg	32,810	—	29,070	27,820	29,080
HHV 3)	wet kcal/kg	7,250	—	6,580	5,780	6,900
(High Heating Value)	wet kJ/kg	30,350	—	27,560	24,210	28,880
LHV 4)	wet kcal/kg	7,100	—	6,450	5,700	6,880
(Low Heating Value)	wet kJ/kg	29,710	—	27,000	23,880	28,790
C	dry wt %	89.1	—	—	83	85.8
H	dry wt %	2.2	—	2	< 0.1	0.3
N	dry wt %	0.6	—	—	0.5	0.6
S	dry wt %	< 0.1	—	—	0.6	0.5
Cl	dry wt %	< 0.1	—	—	< 0.1	< 0.1
Fe	dry wt %	0.09	—	2.56	0.14	0.33
Ca	dry wt %	0.31	—	0.94	0.21	0.38
Si	dry wt %	0.85	—	2.37	3.49	2.78
Al	dry wt %	0.03	—	0.49	2.34	1.57
Na	dry wt %	< 0.01	—	—	—	0.04
K	dry wt %	0.18	—	—	—	0.08
P	dry wt %	0.02	—	—	0.03	0.04
Mg	dry wt %	0.04	—	0.1	0.04	0.14

(Sumber : Japan Keirin Association, 2010)

3.4.5 Sifat Powder

Faktor bentuk dan diameter, dan berat jenis dari powder diasumsikan konstan dan secara spesifik digunakan sebagai data inputan pada program. Spesifik heat dan temperatur di hitung sama dengan fase solid.

Tabel 3. 8 Parameter powder pada pemodelan (Nogomi, 2006).

Diameter (m)	10^{-4}
Berat Jenis (kg/m^3)	500
Faktor Bentuk	1

Tabel 3. 1 Berat Molekuler (kg/kmol)

M_{Fe}	55,85	M_{H}	1.008	M_{Mg}	24.31
M_{O}	16	M_{C}	12.01	M_{Al}	26.98
M_{N}	14.01	M_{Si}	28.09	M_{Ca}	40.08



3.5. Bahasa Fortran

Bahasa pemrograman yang digunakan dalam pemodelan *blast furnace* ini adalah bahasa program fortran. Bahasa program dalam penelitian ini di ambil dari Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials Tohoku University melalui peneliti sebelumnya dimana selanjutnya dilakukan modifikasi sesuai dengan parameter penelitian yang dilakukan. Bahasa Program terdiri dari 122 subroutine dengan menitik beratkan pada perhitungan reaksi kimia, perpindahan panas, perhitungan tekanan, perhitungan kecepatan alir pada beberapa fase.

3.6. Peralatan dan Perlengkapan Penunjang penelitian.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

1. Komputer

Komputer yang digunakan dalam mengerjakan penelitian ini adalah computer personal dengan operating system windows 32-bit. Dalam komputer personal ini akan dilakukan instalasi perangkat lunak untuk mendukung penelitian pemodelan blast furnace. Perangkat lunak yang akan di benamkan ke dalam komputer personal ini diantaranya adalah developer studio dan paraview. Studio developer digunakan untuk melakukan kompilasi dan eksekusi dari bahas program yang ada sedangkan paraview digunakan untuk melakukan plotting dari hasil perhitungan kompilasi yang ada. Untuk mendukung dan melakukan validasi dilakukan instalasi perangkat lunak tecplot. Hal ini dilakukan karena peneliti sebelumnya menggunakan tecplot sehingga diperlukan perangkat lunak tecplot untuk melakukan komparasi hasil yang ada antara pnelitian sebelumnya (DR Sungging Pintowantoro) dengan penelitian yang sedang dilakukan saat ini.

2. *XRF Mining Analyser*

XRF mining analyser adalah peralatan XRF portable yang digunakan untuk medeteksi elemen atau unsur pembentuk dari suatu bahan tambang.

Alat ini pada umumnya hanya digunakan untuk analisa kuantitatif pada bahan galian tambang. Pada penelitian ini digunakan XRF Olympus Delta X untuk mengetahui kandungan unsur pada bijih besi yang akan digunakan dalam pemodelan. Dalam melakukan analisa kandungan unsur pembentuk bijih besi maka terdapat tiga hal yang berpengaruh terhadap benar dan salahnya pengukuran yaitu :

- Bijih besi harus dikondisikan homogen yaitu melalui pencampuran semua sample yang akan dipakai.
- Alat XRF dalam kondisi masih terkalibrasi, hal ini dilakukan karena XRF Olympus Delta X perlu dilakukan kalibrasi ulang setelah sepuluh kali pemakaian .
- Pengambilan sample pada area tambang harus mewakili seluruh area tambang.



Gambar 3.3 *XRF mining analyser*

3. Perangkat lunak Developer Studio

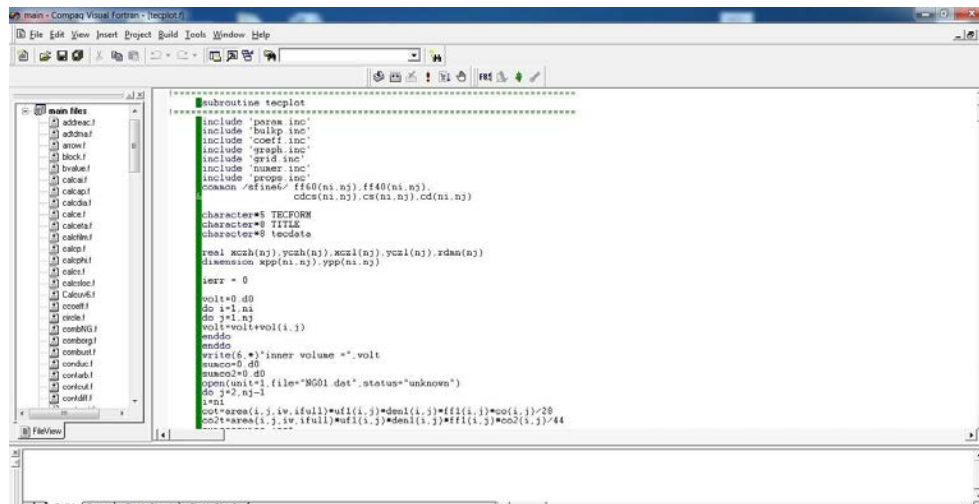
Perangkat lunak studio developer merupakan program untuk melakukan kompilasi dan eksekusi bahasa fortran. Fortran adalah bahas pemrograman yang dikembangkan oleh *international business machine (IBM)* pada tahun 1957. Bahasa fortran sampai saat ini telah mengalami perkembangan pesat. Perubahan perubahan dilakukan menyangkut modifikasi perintah perintah



dasar untuk menjadikan bahasa ini lebih mudah digunakan oleh pemakainya. Pada bahasa fortran terdapat tiga unsure pokok utama agar bahasa fortran dapat di gunakan yaitu.

- Memahami instruksi dan unsur penting yang digunakan pada bahasa fortran
- Mengetahui aturan penulisan, penyajian intruksi, dan cara menggunakan bahasa fortran.
- Mengetahui cara mengkompilasi dan mengeksekusi bahasa fortran.

Dari ketiga unsur utama ini perangkat lunak studio developer merupakan alat bantu untuk melakukan kompilasi dan eksekusi bahasa fortran.



Gambar 3.4. Layout Perangkat Lunak Studio Developer.

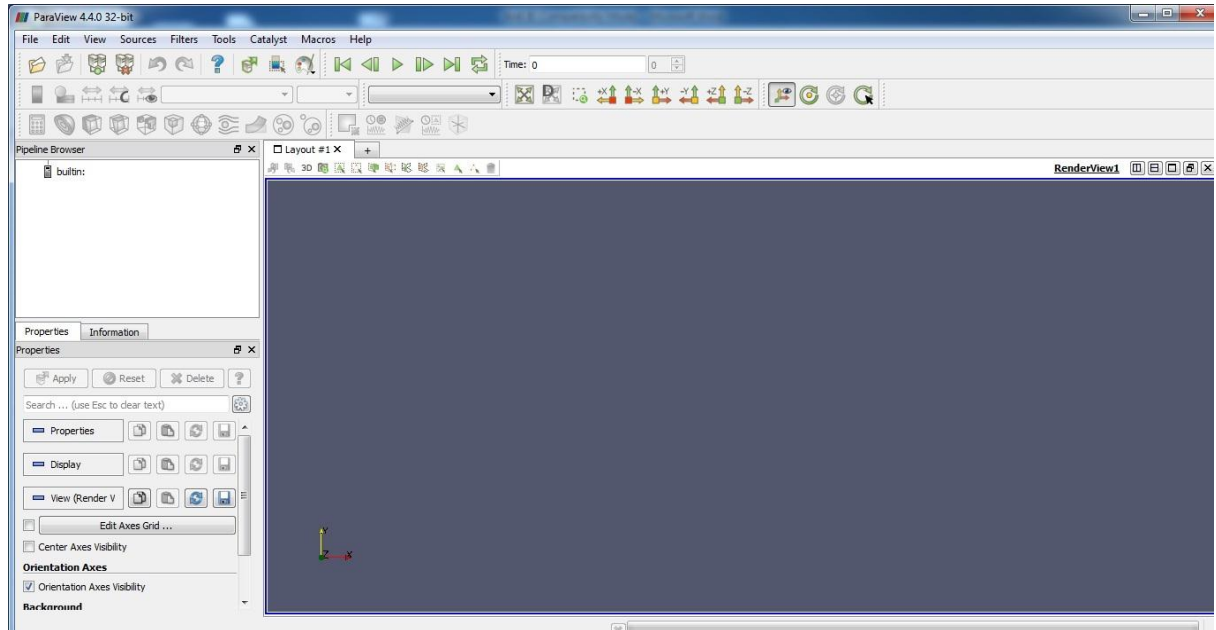
4. Perangkat Lunak Paraview

Paraview adalah perangkat lunak yang dapat diunduh secara gratis oleh siapapun karena bersifat terbuka. Pembuatan dan pengembangan paraview dimulai pada tahun 2000 oleh kolaborasi antara Kitware Inc dan laboratorium nasional Los Alamos di Amerika. Selama tiga tahun pembuatan dan pengembangan perangkat lunak ini didanai oleh pemerintah Amerika. Pada Oktober 2002 paraview pertama kali dikenalkan ke publik dan langsung dapat di akses secara gratis. Paraview pertama kali muncul dengan seri paraview



seri 0.6, selanjutnya pada 2005 muncul seri baru 3.0 dan sekarang keluaran terbaru adalah 5.5.

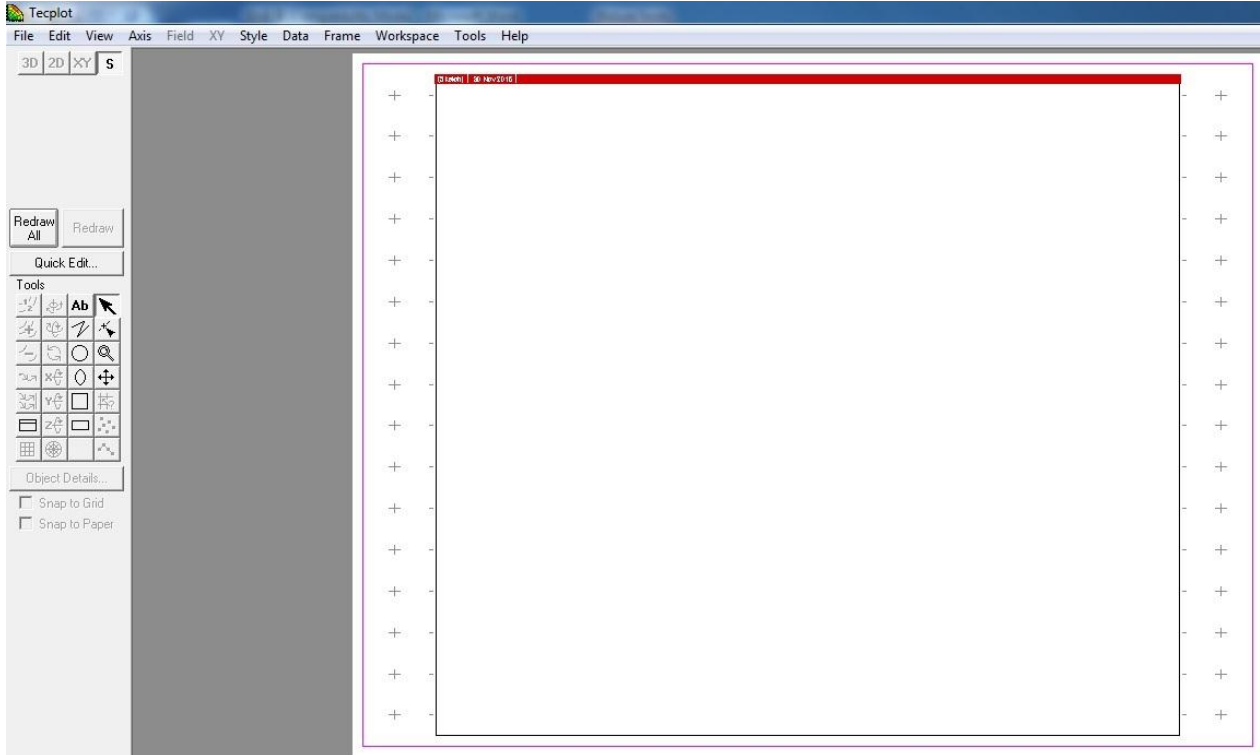
Perangkat lunak ini dapat digunakan untuk melakukan plotting data ke dalam bentuk dua dimensi atau tiga dimensi. Selain itu juga dapat melakukan ekstrapolasi sehingga hasil dua dimensi dapat di ekstrak menjadi tiga dimensi.



3.5. layout Paraview

5. Perangkat Lunak Tecplot

Perangkat lunak ini digunakan untuk melakukan plotting dua dimensi sebagai validasi model yang digunakan. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Dengan bantuan perangkat lunak ini distribusi hasil perhitungan pada eksekusi studio developer dapat dilakukan mengeplotan.



Gambar 3.6 Layout Tecplot

3.7. Tahapan penelitian

Pemodelan *blast furnace* untuk mengetahui fenomena yang terjadi di dalamnya pada penelitian ini memerlukan beberapa tahapan. Tahapan tahapan ini terbagi dalam lima tahapan yaitu :

1. Persiapan data.

Dalam penelitian ini, terlebih dahulu dilakukan persiapan data. Persiapan data diperlukan karena dapat menentukan hasil dari perhitungan pada pemodelan yang dilakukan. Data data yang diperlukan diantaranya adalah :

a) Geometri Blast Furnace

Geometri blast furnace di dapatkan dari berbagai jurnal khususnya hasil penelitian dari DR. Sungging Pintowantoro. Hal ini dilakukan karena geometri aktual dari *blast furnace* di Indonesia belum ada sehingga untuk keperluan validasi maka diambil dari geometri yang



ada pada peneliti sebelumnya sehingga memudahkan dalam hal validasi.

b) Komposisi Bijih Besi

Komposisi iron ore di dapatkan dengan melakukan pengujian XRF dari iron ore milik PT ARS yang berasal dari Solok Sumatera.

c) Komposisi Arang

Komposisi dari arang di dapatkan dari studi literatur perusahaan jepang di Malaysia. Pemilihan arang dari cangkang sawit ini dikarenakan kuantitasnya yang relatif besar di Indonesia, memiliki nilai kalor yang lebih baik dibanding batu bara, kandungan sulfur yang relatif rendah sehingga dampak terhadap lingkungan lebih dapat dikendalikan.

d) Komposisi Kapur

Komposisi kapur di dapatkan dengan melakukan pengujian XRF dari kapur yang berasal dari Tuban.

2. Pembuatan Model Blast Furnace

Pembuatan model blast furnace dilakukan dengan menggunakan model yang telah ada dari penelitian sebelumnya yang dilakukan, akan tetapi memiliki perbedaan apada beberapa item diantaranya :

a) Working volume dari blast furnace

Working volume dari model blast furnace seperti yang tertera pada keterangan Gambar 3.1 yaitu 3914.1 m^3 . Pengaturan working volume ini dengan jalan memberikan inputan diameter dan ketinggian pada subroutine input.

b) Jumlah Tuyser

Jumlah tuyser yang digunakan pada pemodelan blast furnace ini adalah 20 buah. Sama halnya dengan penentuan working volume, jumlah tuyser pada model blast furnace juga di masukkan pada



soubrotine input yang merupakan file masukan untuk memulai perhitungan.

c) Jenis Bahan Bakar dan Reduktor

Jenis reduktor dan bahan bakar yang digunakan adalah arang cangkang sawit. Pendefinisian ini dilakukan dengan memasukkan nilai kalori bahan reduktor dan bahan bakar, kandungan karbon, kandungan sulfur, dan ukuran partikel dan granul dari bahan reduktor saat ada di dalam proses peleburan pada *blast furnace*.

3. Perhitungan data inputan dari proses sebelumnya dengan menggunakan bantuan perangkat lunak developer studio. Tahapan pada perhitungan ini adalah sebagai berikut :

a) Memasukkan data geometri pada file input.dat yaitu dengan variasi jari jari sesuai pada beberapa ketinggian *blast furnace* yaitu

No	Tinggi	Jari jari
1	0	7.1
2	2.4	7.1
3	6.5	7.6
4	9	7.6
5	26.6	5.1
6	29.7	5.1

b) Memasukkan jumlah tuyer sebanyak 40 buah dengan jari jari tuyer 0,056 dan panjang 0,1 pada file input.dat.

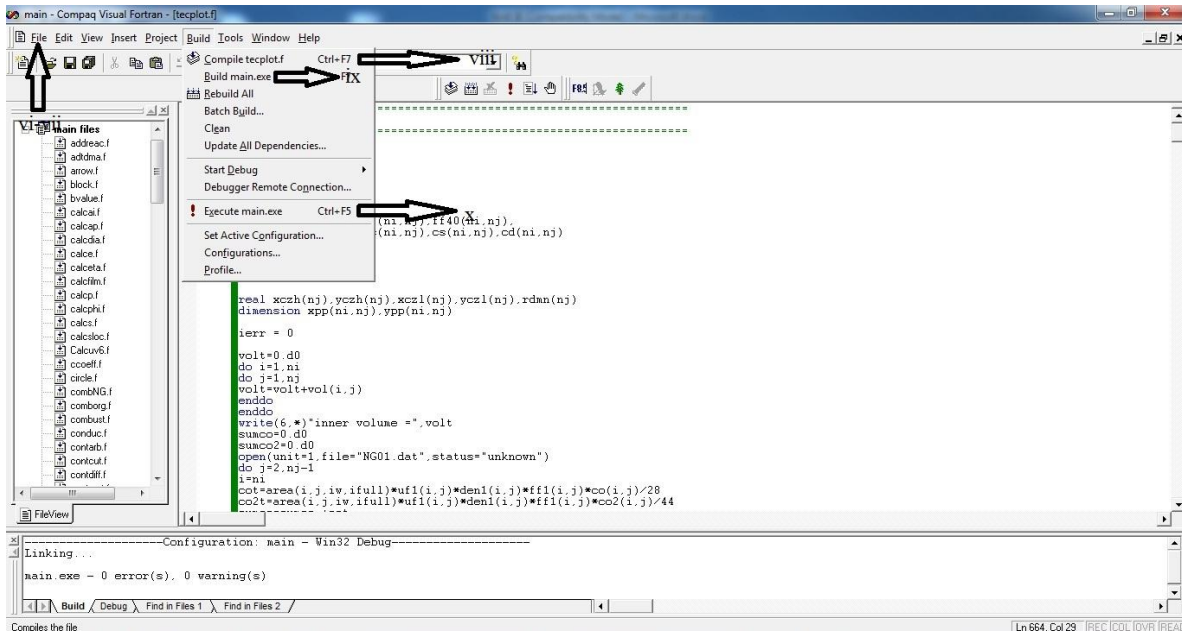
c) Memasukkan kedalaman raceway yaitu 1,5 dengan posisi 1 meter diatas titik tengah tuyre pada bagian atas dan 0,4 dari tengah tuyer pada bagian bawah di file input.dat.

d) Memasukkan data reduktor yaitu kalori arang batok kelapa sawit dengan nilai 7100 pada file.dat.

e) Memasukkan sifat sifat seperti berat jenis arang,bijih besi,powder arang dan berat jenis fase liquid.



- f) Membuka file subroutine pemodelan dengan menggunakan menu utama pada studio developer, semua subroutine yang akan di gunakan dibuka secara keseluruhan.
- g) Melakukan kompilasi terhadap bahasa program yang telah dibuka. Kompailer dalam hal ini studio developer akan menerjemahkan bahasa program yang ada kedalam bahasa teknis. Tujuan utama dari langkah ini adalah mengkompilasi bahasa program, karena sebelum dilakukan eksekusi semua jrnis bahasa program yang digunakan harus melalui tahap kompilasi.
- h) Melakukan pengecekan apakah dalam langkah kompilasi terdapat kesalahan, pada kompailer studio developer jika terdapat keslahan maka akan di tampilkan pada dialog box pada bagian bawah layout. Jika terdapat kesalahan maka harus terlebih dahulu diperbaiki karena jika tidak dilakukan perbaikan program objek akan gagal di eksekusi.
- i) Melakukan perangkaian file kompilasi sehingga terbentuk file workspace, langkah ini bertujuan menghemat waktu jika akan melakukan perubahan data input sehingga tidak perlu melakukan pembuatan program baru.
- j) Melakukan pembuatan file program objek, dengan menggunakan bantuan menu utama build yang ada padaprogram kompailer. Dengan langkah ini maka akan dihasilkan file program objek dengan ekstensi exe.
- k) Melakukan eksekusi pada file program objek melalui main menu *build*. Hasil dari langkah ini adalah di dapatkanya file dengan extensi dat yang dapat di olah dengan menggunakan program bantuan lainnya pada penelitian ini yaitu tecplot dan paraview.

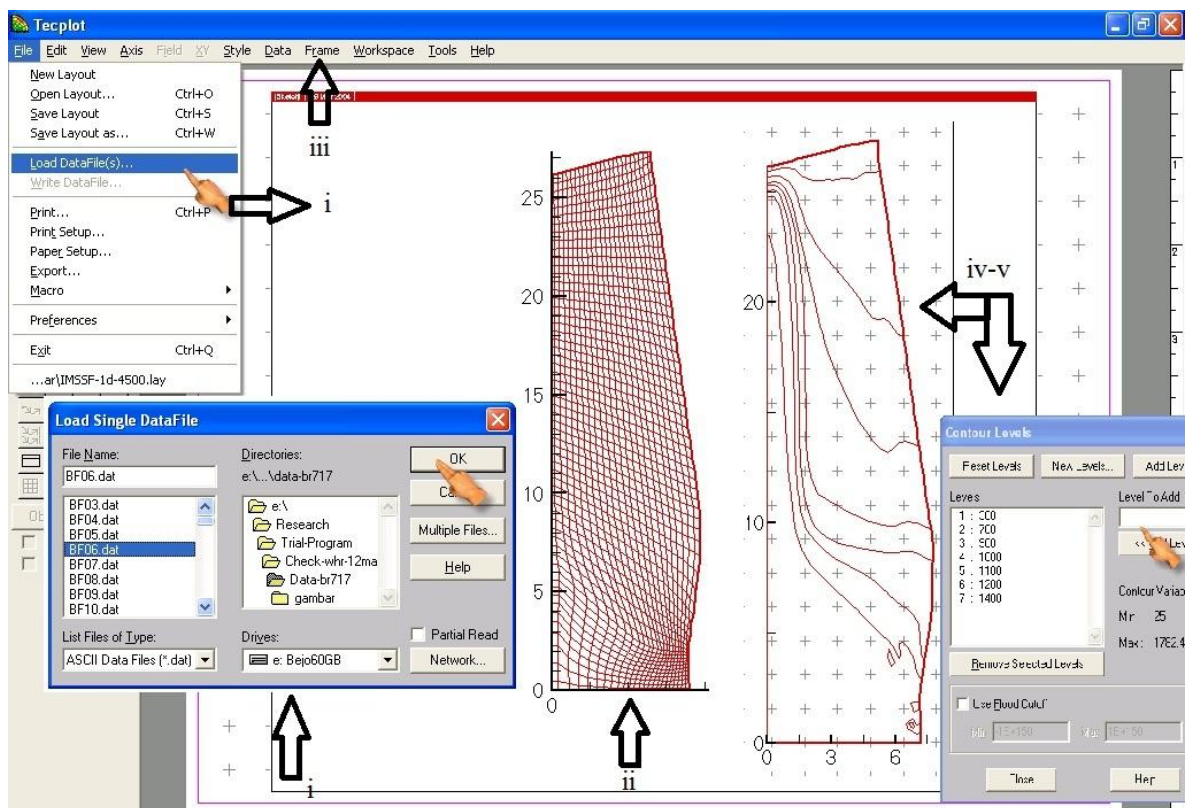


Gambar 3.7. Skema tahapan eksekusi bahasa fortran

Pada proses ini akan didapatkan beberapa hasil diantaranya adalah distribusi temperatur solid, distribusi pada setiap, kecepatan aliran yang terjadi pada *blas furnace*. Hasil pada tahap ini berupa file yang berisi tabel dari besaran nilai yang tersebut sebelumnya dengan tambahan posisi berupa ordinat.

4. Tahapan selanjutnya adalah melakukan plotting dua dimensi menggunakan tecplot untuk mengetahui kontur distribusi secara 2 dimensi sebagai validasi pemodelan. Langkah langkah dalam plotting dua dimensi ini adalah.
 - a) Membuka file hasil eksekusi studio developer melalui data load, sehingga akan ditampilkan grid atau mesh yang ada
 - b) Mengecek grid yang ada pada tampilan tecplot melauai menu utilitas sehingga dapat diketahui apakah meshing berhasil dilakukan.
 - c) Mengatur ukuran frame atau skala yang akan digunakan, dalam pemodelan ini frame yang digunakan adalah ukuran kerta A4 menyesuaikan dengan dokumen laporan yang akan di tampilkan.

- d) Menghidupkan menu contour untuk dapat menampilkan variable kontur yang ada pada output hasil perhitungan dengan menggunakan studio developer
- e) Melakukan pemilihan variable kontur yang akan dilakukan plotting data kedalam geometri yang telah tersedia.
- f) Melakukan plotting hasil perhitungan sesuai dengan item yang akan ditampilkan seperti distribusi temperatur, tekanan, karbon dll.
- g) Penyimpanan gambar melalui screenshoot

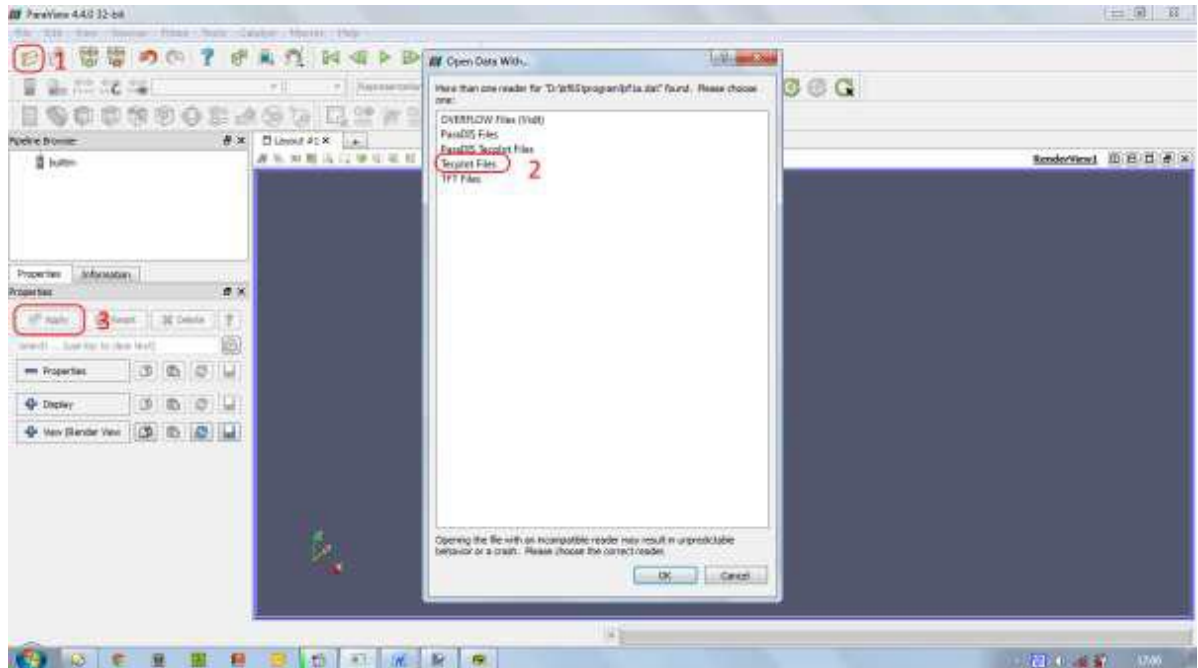


Gambar 3.8. Skema langkah plotting pada tecplot

Hasil dari pengolahan data menggunakan tecplot di dapatkan berbagai gambar plotting dari perhitungan dengan menggunakan studio developer. Data data hasil pengolahan dengan menggunakan tecplot ini selanjutnya digunakan sebagai validasi hasil dengan metode perbandingan dengan peneliti sebelumnya.



5. Melakukan plotting tiga dimensi dengan menentukan sudut putar dan batas frame yang akan dipakai dengan bantuan perangkat lunak paraview. Dengan langkah seperti dibawah ini.
 - a) Membuka data sumber dengan menggunakan data input berupa output dari tecplot tecplot atau menggunakan output dari program studio developer dengan menambahkan keterangan kriteria file tecplot sehingga di dapatkan gambar dua dimensi.
 - b) Melakukan sinkronisasi data yang merupakan hasil plotting dari perangkat lunak tecplot ke dalam data polygon paraview menggunakan menggunakan fasilitas menu utama pada paraview..
 - c) Melakukan transformasi poligon yang ditampilkan agar sejajar sumbu z, hal ini dilakukan karena sumbu z adalah derajat putar untuk melakukan ekstrak data axis simetris sehingga akan dapat diputar sesuai dengan sudut putar yang dikehendaki oleh user.
 - d) Melakukan pemutaran gambar dua dimesi sesuai dengan sumbu putar yang dikehendaki oleh user sehingga di dapatkan plotting hasil perhitungan secara tiga dimensi untuk membentuk volume dengan filter rotational extrusion pada menu utama.
 - e) Melakukan pemilihan jenis variable kontur yang akan ditampilkan dalam hal ini adalah kontur distribusi temperature, distribusi laju alir, tekanan serta populasi fase pada *blast furnace*.
 - f) Melakukan screenshot dan penyimpanan gambar hasil pengolahan dengan format jpg dengan bantuan menu utama.



Gambar 3.9. Skema langkah plotting tiga dimensi

Pada penelitian ini, persiapan atau preparasi tidak hanya dilakukan untuk sampel pengujian akan tetapi juga dilakukan untuk raw material yang akan dimasukkan ke dalam MBF. Persiapan raw material sebelum dimasukkan ke dalam MBF ialah sebagai berikut.

1. Persiapan batuan mineral bijih besi, arang dan kapur atau limestone.
2. Mineral bijih besi dihancurkan dan dikecilkan ukurannya dengan menggunakan jaw crusher. Di sisi lain, arang dan kapur dihancurkan dengan menggunakan palu.
3. Setelah pengecilan ukuran, langkah selanjutnya ialah penimbangan mineral tembaga, arang dan kapur. Penimbangan ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara bijih besi, batu bara dan kapur yang sesuai dengan perhitungan teoritis.
4. Melakukan penembakan dengan menggunakan XRF portable.



3.8 Jadwal Penelitian

No	Aktifitas	MINGGU																
		P/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Pengecekan Program																	
	Compile, build dan eksekusi ulang	Plan																
		Act																
	Pengecekan dan Perbaikan	Plan																
		Act																
2	Pemodelan dan Perhitungan																	
	Validasi Metode	Plan																
		Act																
	Perhitungan Neraca Massa	Plan																
		Act																
	Perhitungan Neraca Panas	Plan																
Act																		
3	Eksekusi	Plan																
		Act																
4	Penyusunan Laporan dan analisis	Plan																
		Act																



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Validasi Pemodelan Blast Furnace

Untuk validasi pemodelan dipergunakan beberapa parameter operasi pada pengoperasian *blast furnace*. Validasi dilakukan pada hasil perhitungan distribusi temperatur, tekanan, laju alir dan distribusi gas karbon monoksida dan dioksida pada kondisi *steady state* yaitu dengan menggunakan parameter yang sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Sungging P, Nagomi dan J Yagi. Pada penelitian tersebut *blast furnace* dioperasikan pada kondisi kecepatan dan jumlah injeksi serbuk reduktor 200 kg/tlc. Parameter operasi ini di sajikan dalam bentuk table 4.1, dan tabel 4.2 seperti dibawah ini.

Tabel 4.1 Parameter operasi model 2D

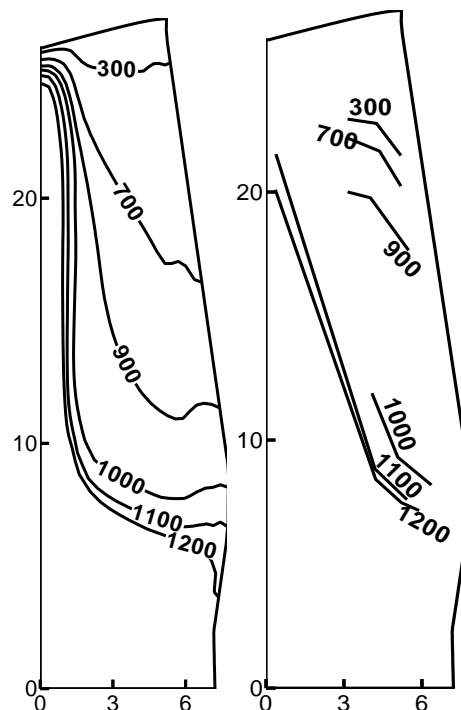
Parameter	Nilai	Unit
Tekanan Gas Pada Bagian atas	2.64	atm
Produktifitas	106.6	kg/s
Oksigen (O ₂)	3	%
Effisiensi pembakaran	73	%
Kecepatan umpan serbuk reduktor	200	Kg/s
Ukuran diameter Serbuk reduktor	0.0001	m

Tabel 4.2 Parameter operasi model 3D

Parameter	Nilai	Unit
Tekanan Gas Pada Bagian atas	2.64	atm
Produktifitas	106.6	kg/s
Oksigen (O ₂)	3	%
Effisiensi pembakaran	73	%
Kecepatan umpan serbuk reduktor	100	Kg/s
Ukuran diameter Serbuk reduktor	0.0001	m

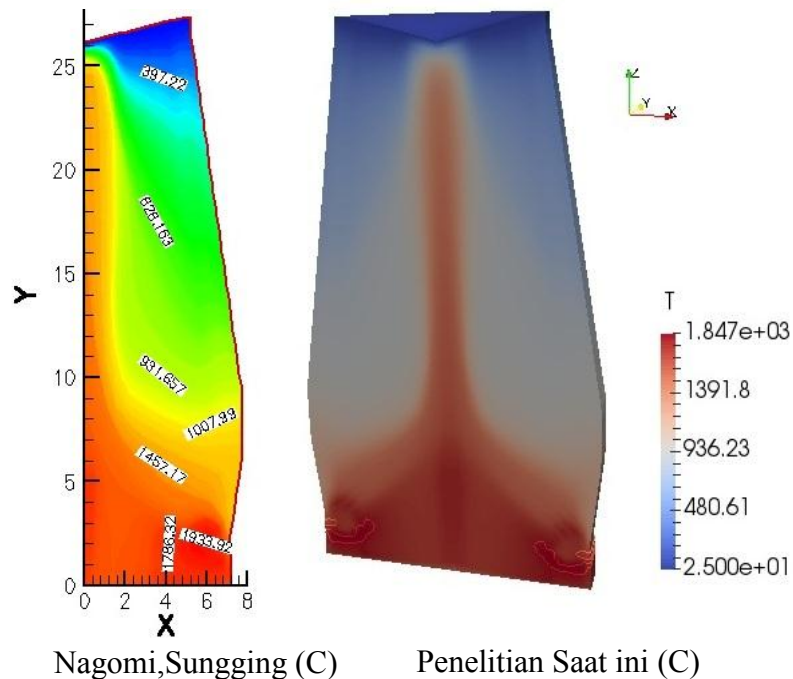


Dua parameter ini di operasikan pada model *blast furnace* dengan volume bagian dalam 4550 m³ dengan parameter geometri yang sama akan tetapi dengan dimensi geometri yang berbeda. Hasil perhitungan yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya di dibandingkan dengan perhitungan pada penelitian ini. Validasi ini dilakukan dikarena validasi secara eksperimental tidak bisa dilakukan karena *blast furnace* dengan kapasitas sesuai model pemrograman tidak tersedia. Oleh karena itu dipilih sebuah model yang telah dilakukan validasi dengan eksperimental *blast furnace* secara langsung. Pada penelitian yang dilakukan oleh Nagomi dan Sungging validasi model dilakukan pada distribusi temperatur. Hasil pemodelan pada penelitian mereka di validasi dengan pengukuran distribusi temperatur pada *blast furnace* dengan menggunakan termokopel. Walaupun pada penelitian mereka menyebutkan validasi hanya dapat dilakukan pada temperatur maksimal 1200 °C sedangkan temperatur di atas ini tidak dapat dilakukan pengukuran diameter karena keterbatasan peralatan ukur pada saat itu.



Gambar 4.1. Perbandingan perhitungan dan pengukuran distribusi temperatur oleh Nagomi dan Sungging dengan jumlah reduktor yang diinjeksikan 200kg/tlc

Dari gambar 4.1 perbedaan perhitungan dan pengukuran temperatur memiliki pola distribusi dan besaran yang relatif sama. Pada hasil pengukuran temperatur di dapatkan area distribusi temperatur pada range 900 – 1000 °C memiliki luas area yang relatif besar dibanding yang lain, area ini disebut sebagai HTRZ (*high Temperatur Thermal Reserve Zone*), sedangkan pada perhitungan di dapatkan luas area yang lebih kecil. Luasan HTRZ dipengaruhi oleh permabilitas dari bahan yang berada pada area tersebut, perbedaan luas antara perhitungan dan pengukuran temperatur kemungkinan besar dikarenakan perbedaan dari sifat permeabilitas material pada area ini. Hal ini karena nilai dari sifat material antara perhitungan dan pengukuran diameter terdapat perbedaan. Perbedaan ini dikarenakan ketidak homogenan sifat material yang ada pada keadaan eksperimental, karena akan sangat sulit melakukan homogenisasi bahan yang diumpankan pada *blast furnace*. Selanjutnya validasi untuk pemodelan yang dibuat adalah dengan membandingkan area distribusi temperatur dua dimensi dan tiga dimensi antara pemodelan pada penelitian ini dan penelitian Nagomi, Sungging seperti gambar 4.2 dibawah ini.

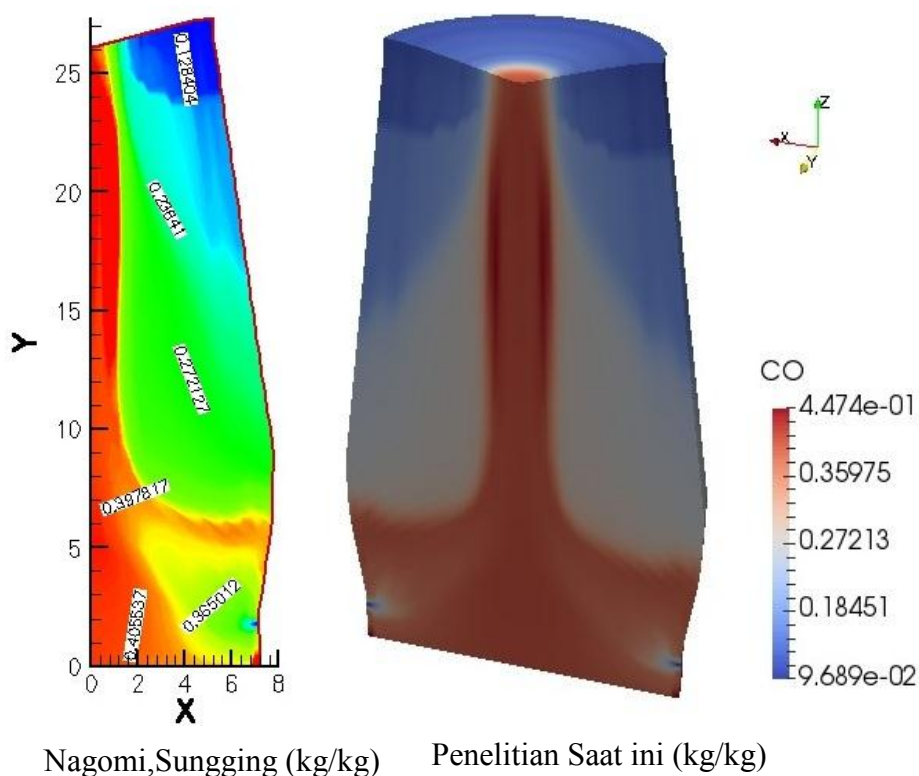


Gambar 4.2. Perbandingan kontur distribusi temperatur dua dimensi dan tiga dimensi pemodelan *blast furnace*



Dari perbandingan distribusi temperatur pada kedua model pada gambar 4.2 dapat diketahui kontur temperatur tidak terdapat perbedaan signifikan baik dari pola kontur ataupun intensitas temperatur yang terjadi selama *blast furnace* beroperasi, perbedaan yang ada kurang dari lima persen. Dengan kata lain model tiga dimensi perhitungan distribusi temperatur dapat digunakan untuk parameter operasi yang lain.

Validasi kedua pada model *blast furnace* pada penelitian ini adalah distribusi gas karbon monoksida. Distribusi gas karbon monoksida dapat digunakan sebagai indikator pembentukan gas karbon monoksida dari reaksi karbon pada area deadman. Perbandingan distribusi kontur gas karbon monoksida antara hasil penelitian Nagomi, Sungging dan penelitian saat ini dapat di lihat pada gambar 4.3.



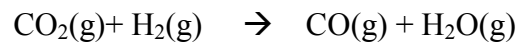
Gambar 4.3. Perbandingan Kontur Distribusi Fraksi Volume $\text{CO}_{(g)}$ pada model dua dan tiga dimensi *blast furnace*.



Gambar 4.3 menunjukkan hasil distribusi gas CO sebagai hasil produk dari reaksi kimia antara karbon dan gas karbon dioksida seperti tertera pada reaksi kimia dibawah ini.

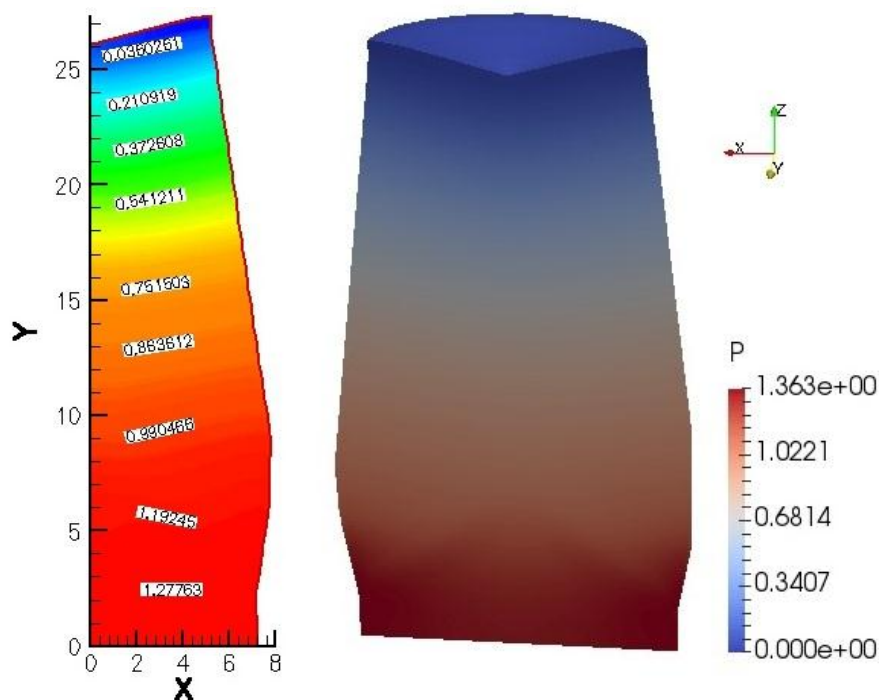


Selain itu gas CO juga dapat dihasilkan dari pembentukan uap air karena reaksi gas karbon dioksida dengan gas hidrogen yang terdapat di dalam *blast furnace* seperti reaksi kimia.



Dari hasil perbandingan diatas diketahui kontur dua dimensi dan tiga dimensi memiliki pola distribusi yang sama serta nilai fraksi volume gas karbon monoksida yang relatif sama pula sehingga model tiga dimensi untuk mengetahui fenomena reaksi pembentukan uap air dan reaksi karbon dengan gas karbon dioksida dapat diterapkan pada parameter operasi *blast furnace* yang lain.

Validasi ketiga dari penelitian ini adalah validasi distribusi tekanan pada *blast furnace*. Tekanan memiliki peran yang penting dalam proses produksi besi kasar/*pig iron*. Jika dalam beroperasi *blast furnace* mengalami *pressure drop* yang tinggi maka reaksi reduksi dan proses pencairan logam pada area bagian bawah *blast furnace* dapat mengalami gangguan. Untuk melakukan validasi ini parameter operasi yang digunakan tetap sama dengan validasi perhitungan yang lainnya. Perbandingan kontur tekanan di lihat dari keseluruhan bagian area pada *blast furnace*. Dari hasil perbandingan model dua dimensi dan tiga dimensi ini maka dapat diketahui apakah model tiga dimensi yang ada dapat digunakan pada parameter operasi yang lain.

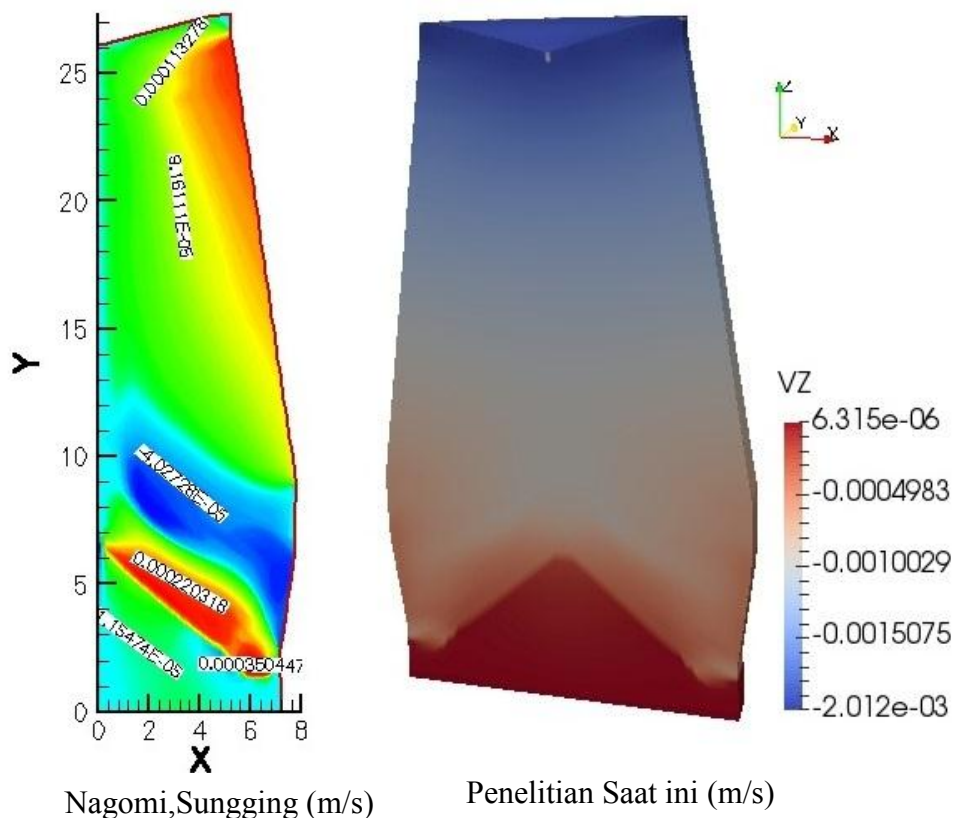


Nagomi, Sungging (atm) Penelitian Saat ini (atm)

Gambar 4.4 Perbandingan kontur distribusi tekanan pada model dua dan tiga dimensi *blast furnace*.

Perbandingan distribusi tekanan pada model dua dan tiga dimensi memiliki pola kontur yang sama yaitu tekanan tertinggi terjadi pada daerah bagian bawah dan bertahap mengalami penurunan pada bagian atas dari model *blast furnace*. Nilai tekanan dari kedua buah model juga memiliki nilai yang tidak mengalami perbedaan yang signifikan dengan rentan kesalahan kurang dari lima persen. Pola distribusi tekanan ini dipengaruhi oleh pola distribusi temperatur dimana semakin tinggi intensitas temperatur maka akan di peroleh nilai tekanan yang tinggi pula, dengan kata lain tekanan dan temperatur berbanding linier di dalam pengoperasian *blast furnace*. Dari hasil perbandingan ini model tiga dimensi untuk perhitungan tekanan pada *blast furnace* dapat digunakan pula untuk melakukan evaluasi dan penelitian terhadap performa *blast furnace* pada kondisi operasi yang lain.

Validasi terakhir yang dilakukan pada pemodelan tiga dimensi *blast furnace* adalah validasi distribusi laju alir yang ada di dalam *blast furnace*. Laju alir ini dapat digunakan untuk menentukan tingkat produktivitas dari parameter yang lain seperti jumlah reduktor yang digunakan, fluks yang digunakan dan efisiensi dari pembakaran yang terjadi selama proses peleburan bijih besi terjadi. Dengan menggunakan parameter operasi yang sama seperti yang tertera pada table 4.1 dan 4.2 maka dilakukan perbandingan hasil antara model dua dimensi dan model tiga dimensi seperti tertera pada gambar 4.5



Gambar 4.5. Perbandingan kontur distribusi kecepatan dua dimensi dan tiga dimensi pemodelan *blast furnace*



4.2. Analisa Distribusi Temperatur.

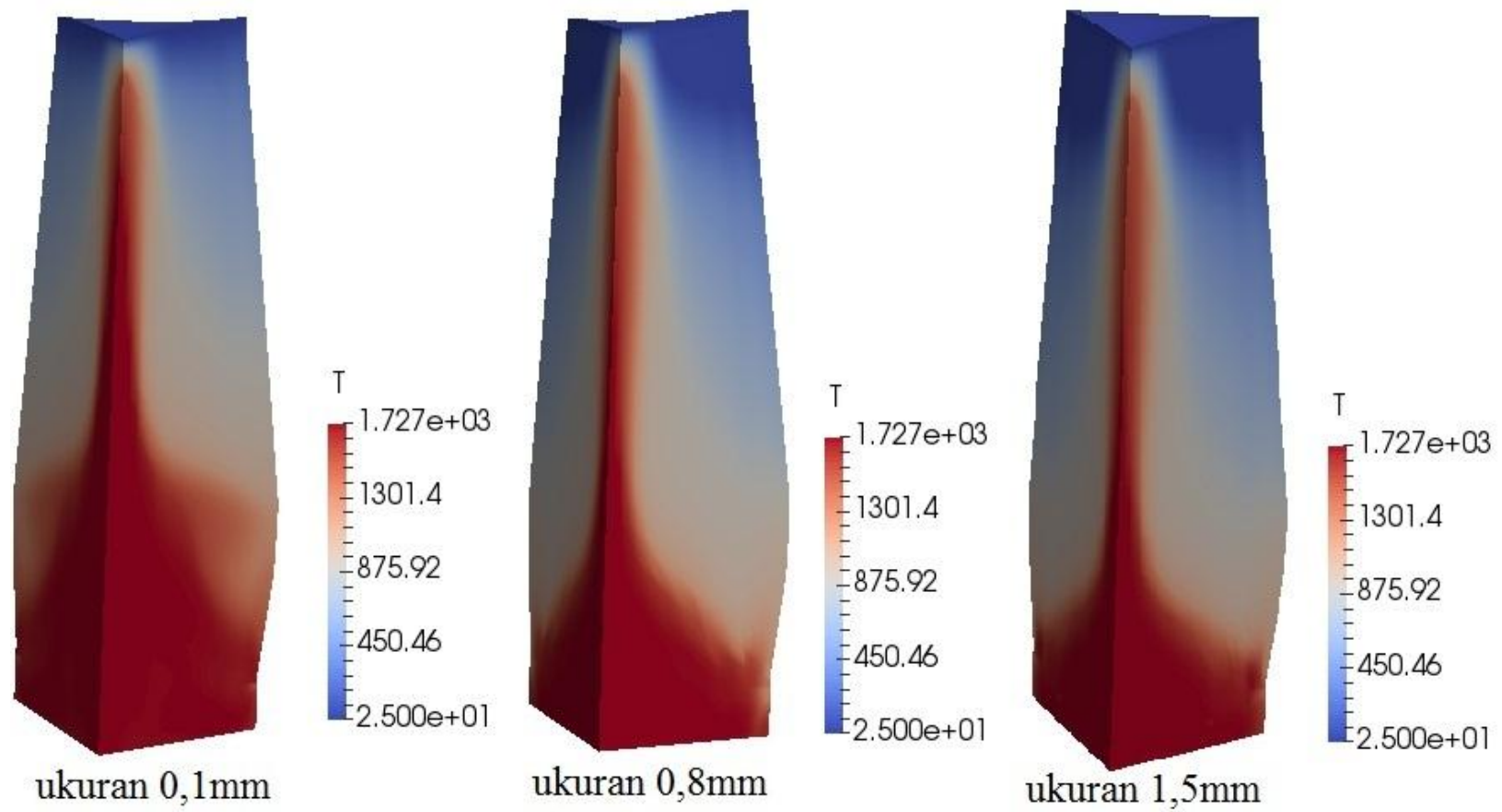
4.2.1. Faktor ukuran diameter injeksi serbuk reduktor /PKS

Bahan bakar dan reduktor yang diinjeksikan pada saat *blast furnace* beroperasi memiliki tujuan agar suplai karbon saat *blast furnace* beroperasi tetap terjaga sehingga kebutuhan serbuk karbon saat reduksi secara langsung tetap ada dan diharapkan mengalami kenaikan sehingga efisiensi produktivitas naik. Disamping itu Serbuk karbon juga dibutuhkan dalam reaksi pembentukan gas karbon monoksida pada *partial combustion*. Gas karbon monoksida ini akan mereduksi hematite, magnetit dan wustit, dengan kata lain serbuk karbon dari arang ini akan mempengaruhi terjadinya reduksi langsung dan tak langsung.

Pada kenyataanya ukuran diameter serbuk yang digunakan memiliki variasi ukuran diameter yang berbeda beda tergantung dari screening yang terpasang pada crusher sebelum serbuk tersebut di injeksikan kedalam *blast furnace*. Karena adanya perbedaan ukuran diameter pada implementasinya maka perlu diketahui fenomena distribusi temperatur yang terjadi pada *blast furnace* karena faktor ukuran diameter reduktor yang di injeksikan kedalam *blast furnace*. Untuk mensimulasikan faktor ukuran diameter reduktor terhadap performa *blast furnace* maka di gunakan parameter operasi *blast furnace* dengan memvariasikan ukuran diameter reduktor yang diinjeksikan ke dalam *blast furnace* yaitu dengan ukuran diameter 0,1mm, 0,8mm dan 1,5mm seperti tertera pada table 4.3

Tabel.4.3. Parameter Operasi *blast furnace* (PKS Injection 100kg/tlc)

Parameter	Nilai	Unit
Tekanan gas pada bagian atas	2.64	atm
Produktifitas	108.95	kg/s
Oksigen (O ₂)	3	%
Effisiensi pembakaran	73	%
Kecepatan umpan serbuk reduktor	10.5	Kg/s
Ukuran diameter Serbuk reduktor	0.0001,0.0008,0.0015	m



Gambar 4.6. Distribusi temperatur *blast furnace* karena faktor ukuran diameter serbuk reduktor .



Dari hasil perhitungan dengan menggunakan pemodelan menghasilkan pola kontur temperatur seperti pada gambar 4.6. Dari hasil perhitungan temperatur tertinggi dan temperatur terendah untuk ketiga jenis model tidak mengalami perubahan yaitu temperatur maksimal 1727 °C dan temperatur terendah 25 °C. Perbedaan yang signifikan terdapat pada bagian bawah dari *blast furnace*. Area dengan range temperatur 1300°C- 1700°C memiliki pola semakin kecil ukuran diameter serbuk yang di injeksikan kedalam *blast furnace* maka luas area ini akan mengalami peningkatan. Hal ini terlihat dengan jelas pada gambar 4.6 yang menunjukkan luasan area panas pada ukuran diameter serbuk 0,1mm lebih luas dibandingkan dengan ukuran diameter serbuk 0,8 dan begitu pula pada area luasan panas pada ukuran diameter 0,8mm lebih luas dibandingkan dengan ukuran diameter 1,5mm. Luasan area panas yang terdapat pada bagian bawah ini turut pula mempengaruhi intensitas panas pada bagian tengah dan atas.

Perbedaan distribusi temperatur pada bagian bawah dikarenakan luasan permukaan dari reduktor yang berkontak dengan fluida yang bergerak mengalami perbedaan satu sama lain. Semakin kecil ukuran diameter serbuk maka luasan area yang mengalami kontak langsung dengan fluida baik gas atau logam cair akan semakin tinggi sehingga intensitas temperatur pun akan naik. Hal ini korelasi dengan perpindahan panas karena konveksi dan konduksi. Semakin besar luasan permukaan serbuk arang yang ada pada daerah *combustion* maka pembakaran karbon karena bereaksi dengan oksigen akan semakin tinggi. Semakin tinggi kuantitas karbon yang bereaksi dengan oksigen akan berdampak pada semakin besar pula energi yang dihasilkan karena reaksi antara karbon dengan oksigen merupakan reaksi eksotermik (melepas panas). Reaksi eksotermik antara karbon dengan oksigen akan menyebabkan kenaikan temperatur.

4.2.2. Faktor jumlah injeksi serbuk reduktor/PKS



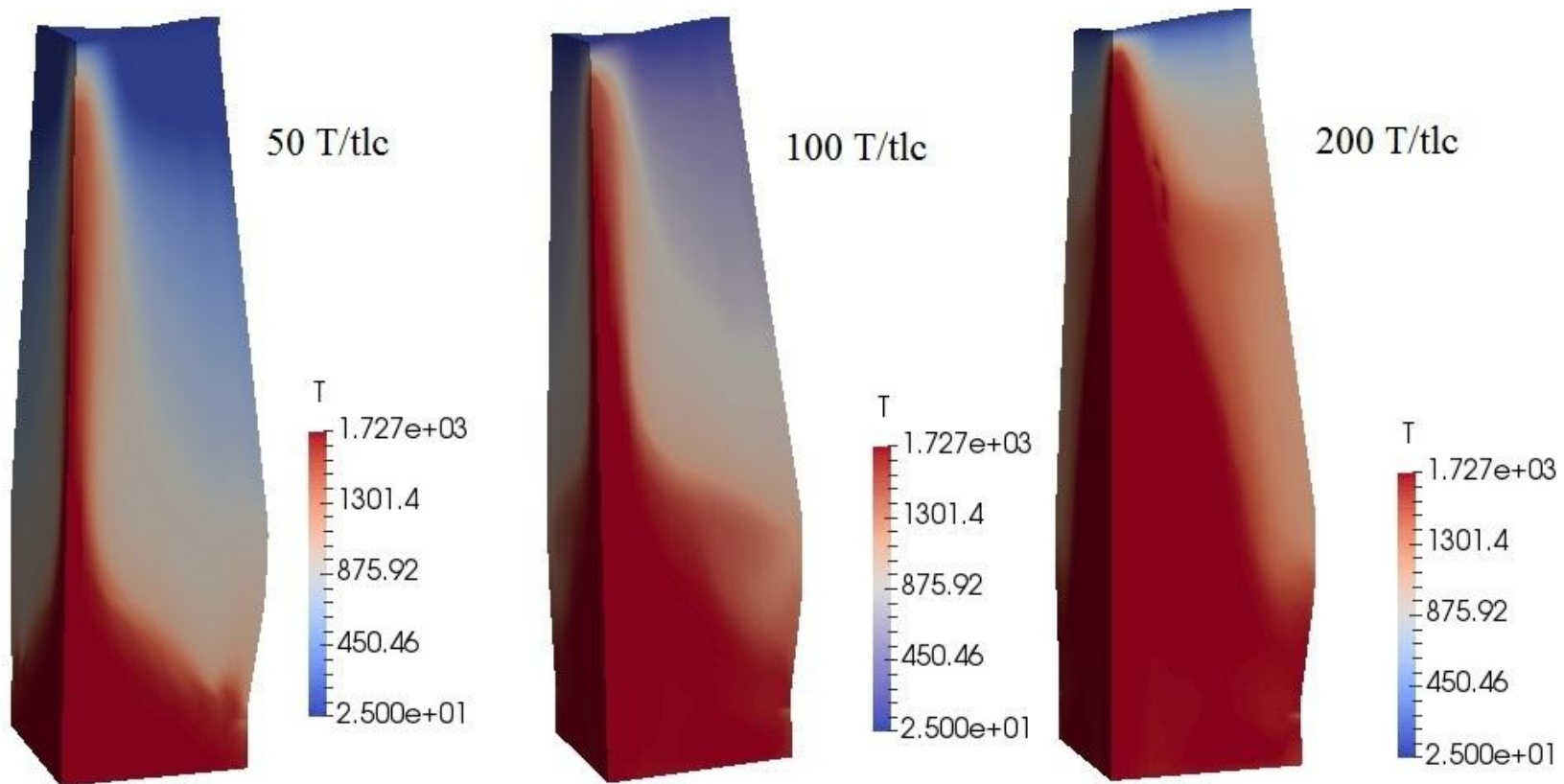
Variabel lain yang di gunakan dalam pemodelan ini adalah jumlah reduktor yang di injeksikan ke dalam *blast furnace*. Pada penelitian ini jumlah serbuk reduktor yang di injeksikan ke dalam *blast furnace* digunakan sebagai variable perhitungan karena mempengaruhi biaya produksi besi kasar/*pig iron*. Hal ini perlu dilakukan untuk mengetahui sejauh mana perbedaan produksi yang terjadi akibat pemakaian jumlah serbuk reduktor arang.

Untuk mengetahui perbedaan dan pengaruh jumlah pemakaian reduktor dalam model ini digunakan tiga kondisi operasi yang berbeda berbasis pada penggunaan jumlah injeksi arang yang dimasukkan ke dalam *blast furnace*. Jumlah serbuk arang yang digunakan dalam model ini adalah 50 kg/tlc, 100kg/tlc, dan 200 kg/tlc. Secara umum parameter operasi *blast furnace* tersebut adalah sebagai berikut.

Tabel 4.4. Parameter operasi berdasarkan jumlah serbuk arang

Parameter	Jumlah Serbuk Arang		
	50 kg/tlc	100 kg/tlc	200 kg/tlc
Tekanan Gas Pada Bagian atas (atm)	2.64	2.64	2.64
Produktifitas (kg/s)	111.7	108.95	106.6
Oksigen/O ₂ (%)	3	3	3
Effisiensi Pembakaran (%)	83	83	83
Kecepatan umpan serbuk arang (kg/s)	5.9	10.9	21.4
kecepatan umpan arang (kg/s)	49.15	41.5	33.4
Ukuran diameter Serbuk arang (m)	0.0001	0.0001	0.0001

Dari ketiga parameter operasi seperti pada tabel 4.4 dapat diketahui bahwa perbedaan yang terjadi karena pengaruh penambahan serbuk arang yang di injeksikan ke dalam *blast furnace* memiliki dampak yang begitu signifikan. Hal ini dikarenakan secara empiris intensitas tinggi rendahnya temperatur dipengaruhi oleh kuantitas reduktor yang ada di dalam *blast furnace*, selain itu juga dipengaruhi oleh tinggi rendahnya *blast rate* yang digunakan saat *blast furnace* beroperasi. Hal ini tampak dari luasan area yang ada pada gambar 4.7.



Gambar 4.7. Distribusi temperatur *blast furnace* karena jumlah serbuk reduktor .

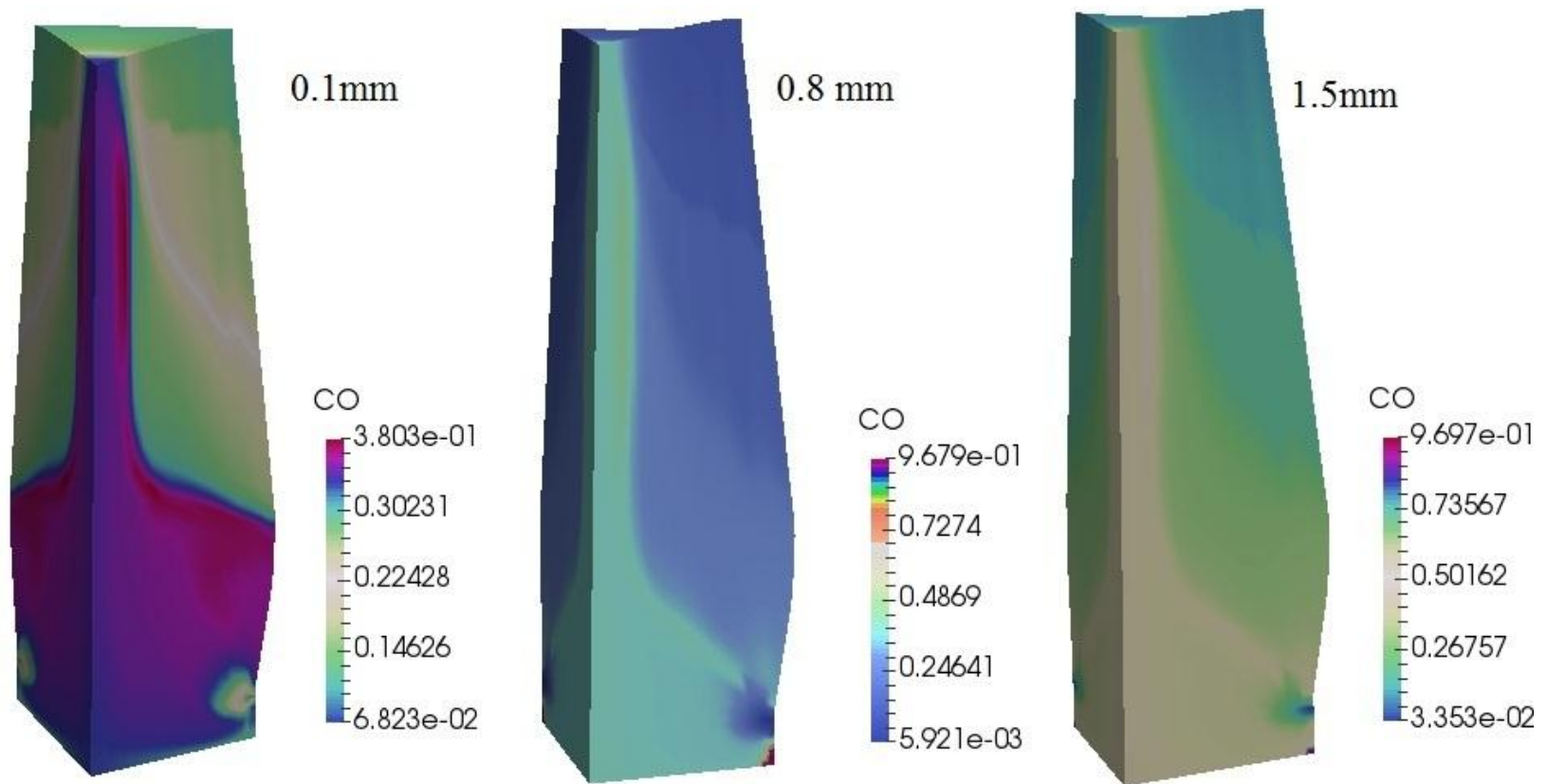


Pada gambar 4.8 dapat diketahui perbandingan luas area dengan range temperatur 1300°C - 1700°C pada bagian bawah *blast furnace* mengalami perbedaan yang signifikan. Luas area bertambah seiring dengan bertambahnya jumlah serbuk arang yang diinjeksikan. Fenomena ini dikarenakan jumlah karbon yang terbakar lebih banyak sehingga secara langsung mempengaruhi luas area yang ada, semakin banyak karbon yang terbakar maka luasan area dan intensitas temperatur akan mengalami kenaikan. Hal ini sama dengan perbandingan saat variabel ukuran diameter serbuk arang digunakan seperti yang tertera pada Gambar 4.6. Dari pemodelan dengan dua jenis variabel yaitu ukuran diameter serbuk dan jumlah arang yang diinjeksikan ke dalam *blast furnace*, jumlah serbuk arang lebih berpengaruh terhadap distribusi temperatur yang ada di dalam *blast furnace* dibanding dengan variabel ukuran diameter serbuk arang.

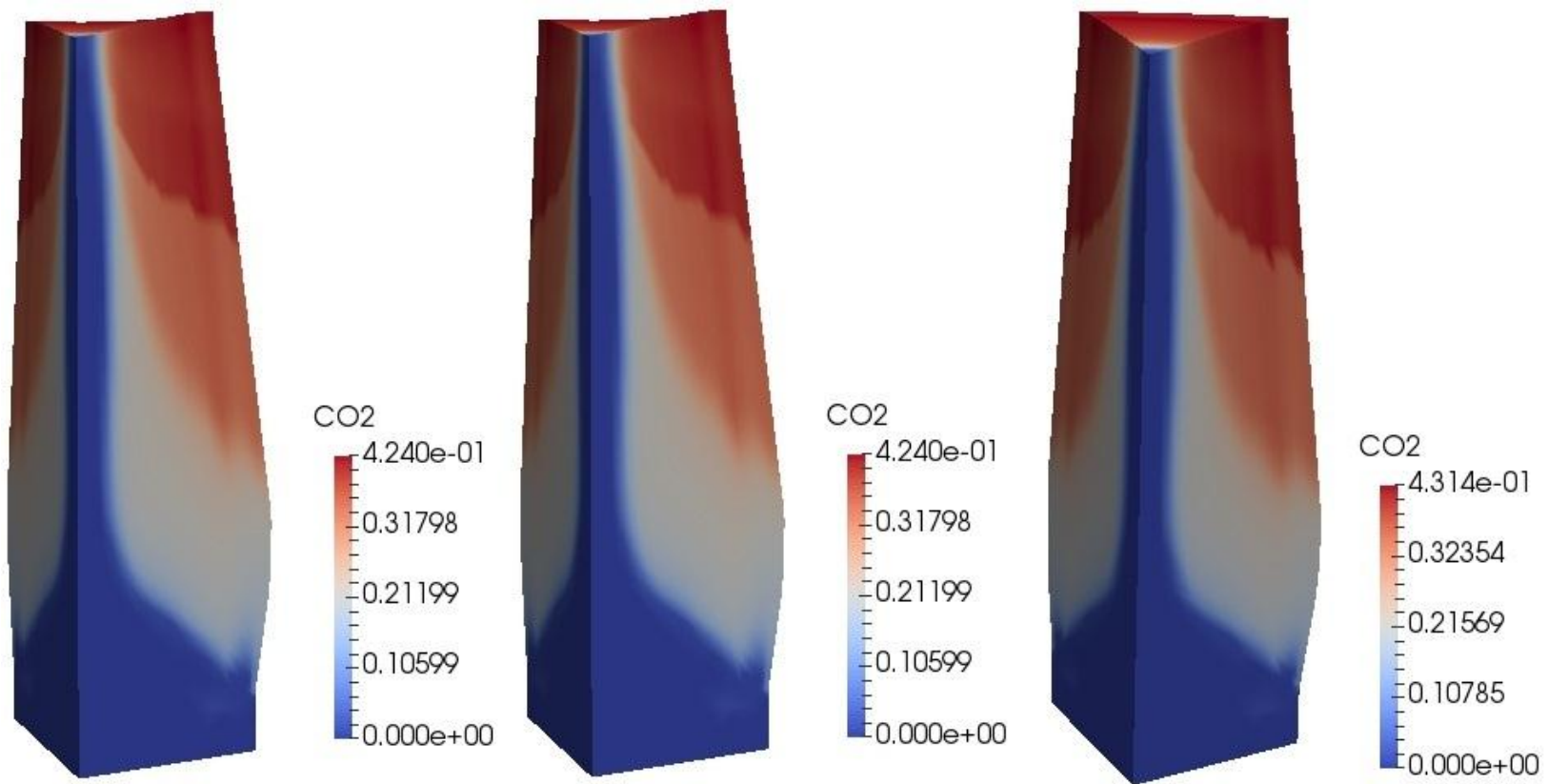
4.3. Analisa Distribusi Gas Karbon Monoksida dan Dioksida

4.3.1 Faktor ukuran diameter injeksi serbuk reduktor /PKS

Dalam pembahasan sebelumnya ukuran diameter serbuk arang yang diinjeksikan dapat mempengaruhi distribusi temperatur pada *blast furnace*. Dengan parameter operasi yang sama pada penelitian ini akan dikaji pula fenomena distribusi gas karbon monoksida dan karbon dioksida. Fenomena ini sangat penting karena gas karbon monoksida dapat mereduksi secara tidak langsung hematit sehingga secara tidak langsung jumlah gas karbon monoksida sangat berperan dalam menentukan keberhasilan produksi besi kasar. Gas karbon monoksida terbentuk dari reaksi pembakaran karbon sehingga ukuran diameter dari arang yang diinjeksikan akan memberikan fenomena yang berbeda beda. Untuk mengetahui pengaruh ukuran distribusi gas karbon monoksida dan karbon dioksida dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan 4.9.



Gambar 4.8 Distribusi gas CO pada *blast furnace* karena faktor ukuran diameter serbuk reduktor .



Gambar 4.9. Distribusi gas CO₂ pada *blast furnace* karena faktor ukuran diameter serbuk reduktor.



Gas karbon dioksida pada bagian bawah *blast furnace* terbentuk dari reaksi *full combustion*, yaitu reaksi pembakaran karbon dengan oksigen. Semakin tinggi jumlah karbon yang terbakar maka secara langsung akan menaikkan pula jumlah populasi gas karbon dioksida pada bagian bawah *blast furnace*. Pada variasi ukuran serbuk arang dapat diketahui perbedaan diameter serbuk antara 0,8mm sampai dengan 1,5mm tidak terjadi perbedaan yang signifikan untuk pola kotur akan tetapi terjadi perbedaan intensitas gas karbon dioksida dimana gas karbon dioksida dan monoksida pada ukuran yang lebih besar memiliki intensitas yang sedikit lebih tinggi, fenomena ini dapat terlihat pada gambar 4.8 dan 4.9. Sedangkan perbedaan yang relatif tampak signifikan ditunjukkan pada distribusi populasi gas karbon dioksida dan monoksida saat ukuran diameter arang 0,1mm selain terjadi perbedaan pola kontur/luasan distribusi, intensitas gas karbon dioksida juga mengalami penurunan. Dari hasil ini menjelaskan bahwa semakin kecil ukuran diameter serbuk akan menurunkan intensitas gas karbon dioksida akan tetapi membuat luasan area menjadi lebih lebar, sedangkan untuk ukuran diameter serbuk yang relatif besar (0,8-1.5mm) kenaikan intensitas sangat kecil atau dapat dikatakan tidak terjadi perbedaan hal ini dikarenakan luasan area dengan temperatur pembakaran (1300°C - 1700°C) relatif sama.

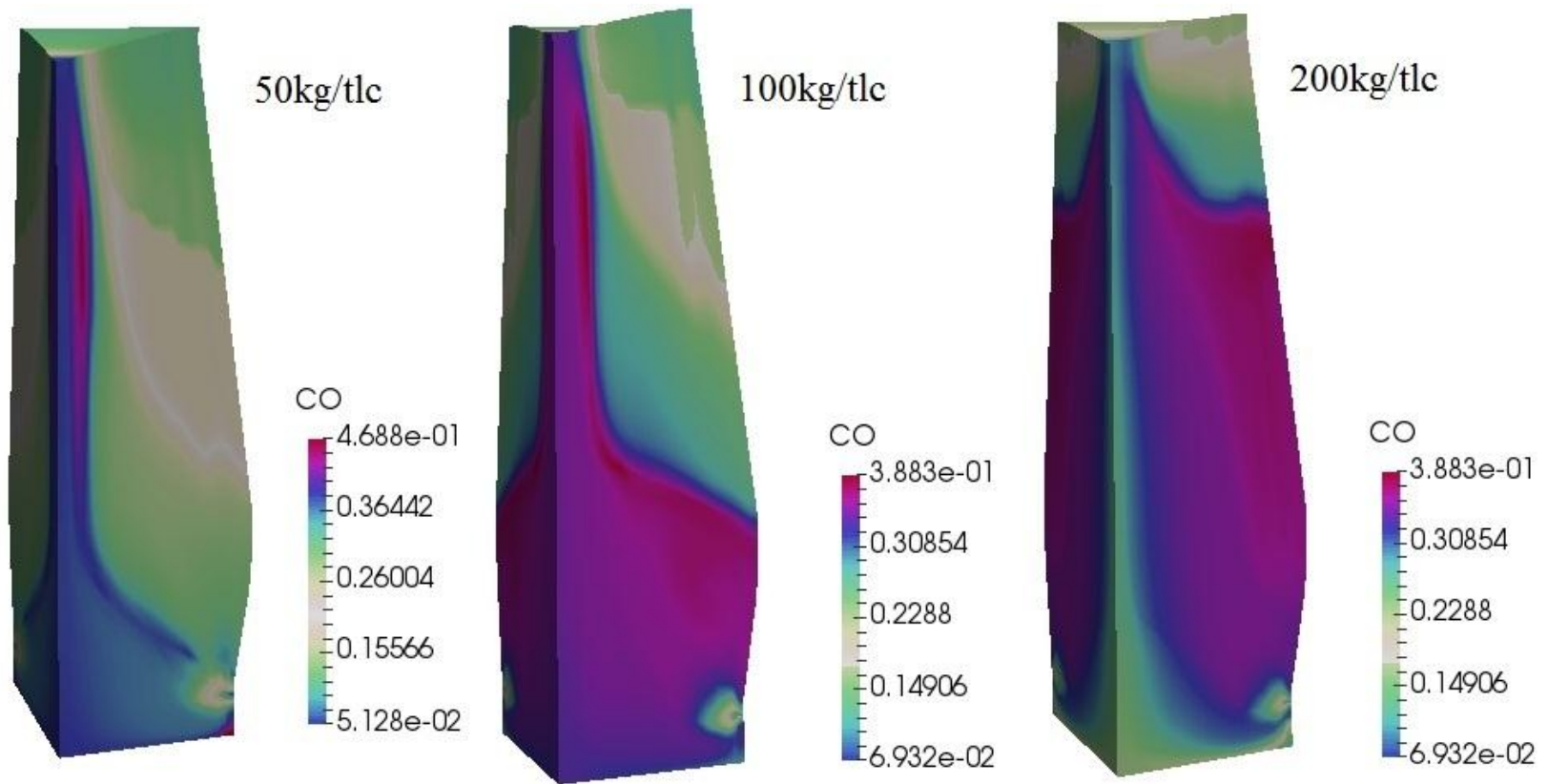
Pada bagian area kohesif gas karbon dioksida terbentuk dari reaksi reduksi tidak langsung yang melibatkan karbon monoksida melalui reaksi hematit, magnetit dan wustit dengan gas karbon monoksida. Untuk ukuran diameter serbuk 0,8-1,5mm tidak mengalami perbedaan pola distribusi sedangkan pada ukuran 0,1 mm terdapat perbedaan yang relatif besar pada pola distribusi gas karbon dioksida dan monoksida. Perbedaan ini dikarenakan perbedaan distribusi temperatur yang terjadi sehingga tingkat reaksi pembentkan gas yang terjadi di daerah kohesif juga mengalami perbedaan. Pada distribusi dengan ukuran serbuk 0,1 mm distribusi yang terjadi lebih heterogen dengan luasan area intensitas yang lebih bervariasi.



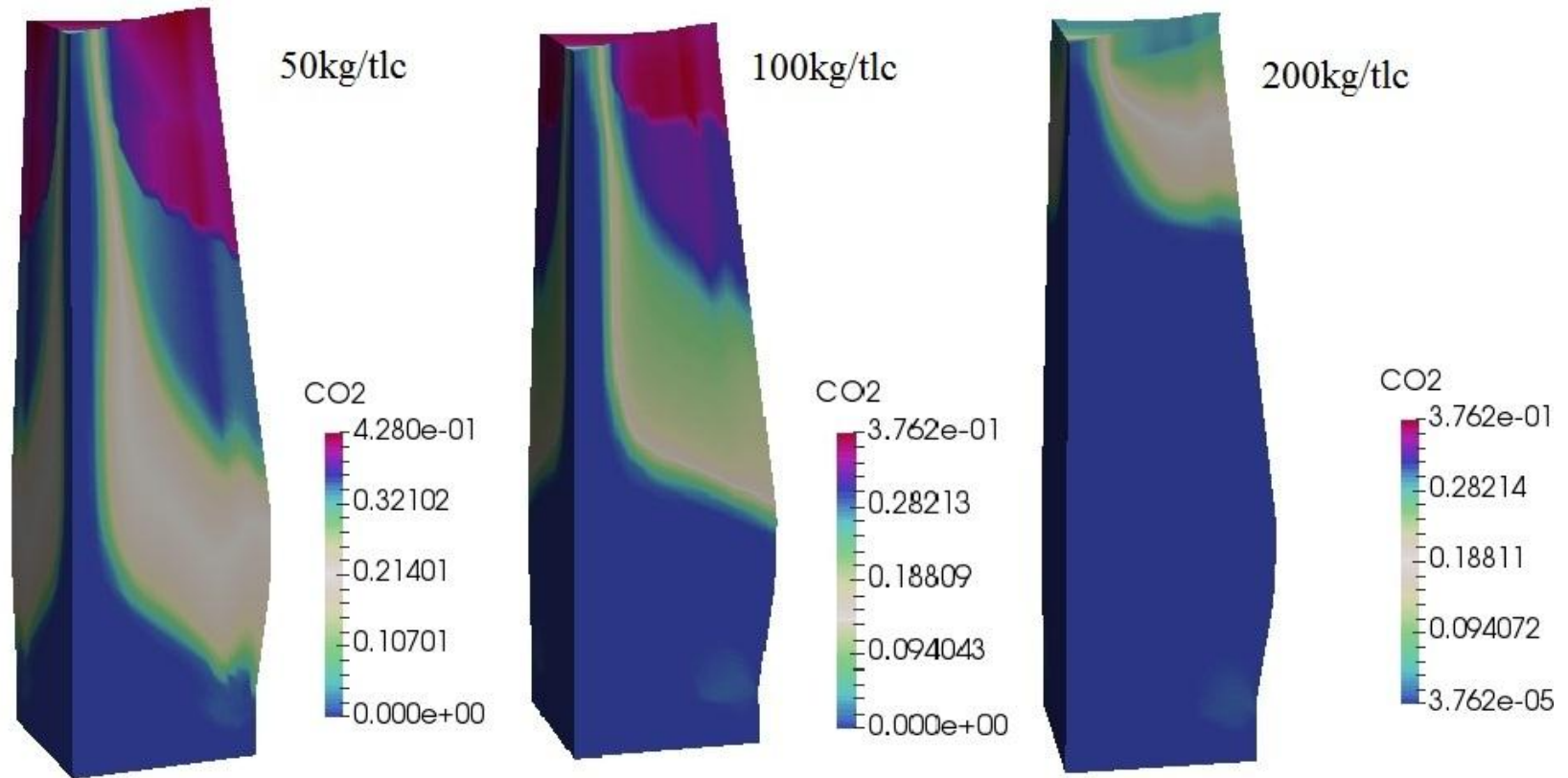
4.3.2 Faktor jumlah injeksi serbuk reduktor /PKS

Parameter operasi *blast furnace* yang sama dengan diskripsi pada tabel 4.4 dengan menggunakan tiga variabel jumlah serbuk yang digunakan (50,100 dan 200 kg/tlc) dilakukan untuk mengetahui fenomena distribusi fraksi volume gas karbon dioksida dan monoksida yang terjadi di dalam *blast furnace*. Alasan yang mendasari perlunya melakukan analisa fenomena ini adalah aspek biaya produksi karena pemakaian bahan reduktor arang yang digunakan dalam produksi. Keberadaan gas karbon dioksida dan monoksida seperti yang dijelaskan sebelumnya dapat menjadi indikasi terjadi reaksi reduksi tak langsung hematit, magnetit dan wustit menjadi kunci penting dalam produksi menggunakan teknologi *blast furnace*.

Dari hasil perhitungan diketahui pada gambar 4.10 pola distribusi fraksi volume gas karbon monoksida dengan range fraksi volume 0,34-0,38 mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan jumlah serbuk arang yang di injeksikan, sedangkan pada pola distribusi gas karbon dioksida semakin tinggi jumlah serbuk arang yang di injeksikan maka pola distribusi gas karbon dioksida akan semakin homogen. Hal ini terlihat dari gambar 4.11. Fenomena kenaikan gas karbon monoksida terutama pada bagian bawah *blast furnace* menunjukkan terjadinya reaksi karbon statik dari serbuk arang bereaksi dengan oksigen hasil suplai dari blower menghasilkan gas karbon monoksida. Sedangkan pada pola kontur gas karbon dioksida pada bagian bawah *blast furnace* mengalami penurunan intensitas fraksi volume. Fenomena ini menggambarkan adanya reaksi karbon yang tidak terbakar. Dengan demikian model *blast furnace* ini dapat digunakan untuk memprediksi distribusi pergerakan serbuk karbon static dan efek parameter lain yang mempengaruhi produktifitas populasi gas karbon seperti perpindahan panas dan fenomena transport.



Gambar 4.10. Distribusi gas CO pada *blast furnace* karena faktor jumlah serbuk reduktor yang di injeksikan



Gambar 4.11. Distribusi gas CO₂ pada *blast furnace* karena faktor jumlah serbuk reduktor yang di injeksikan

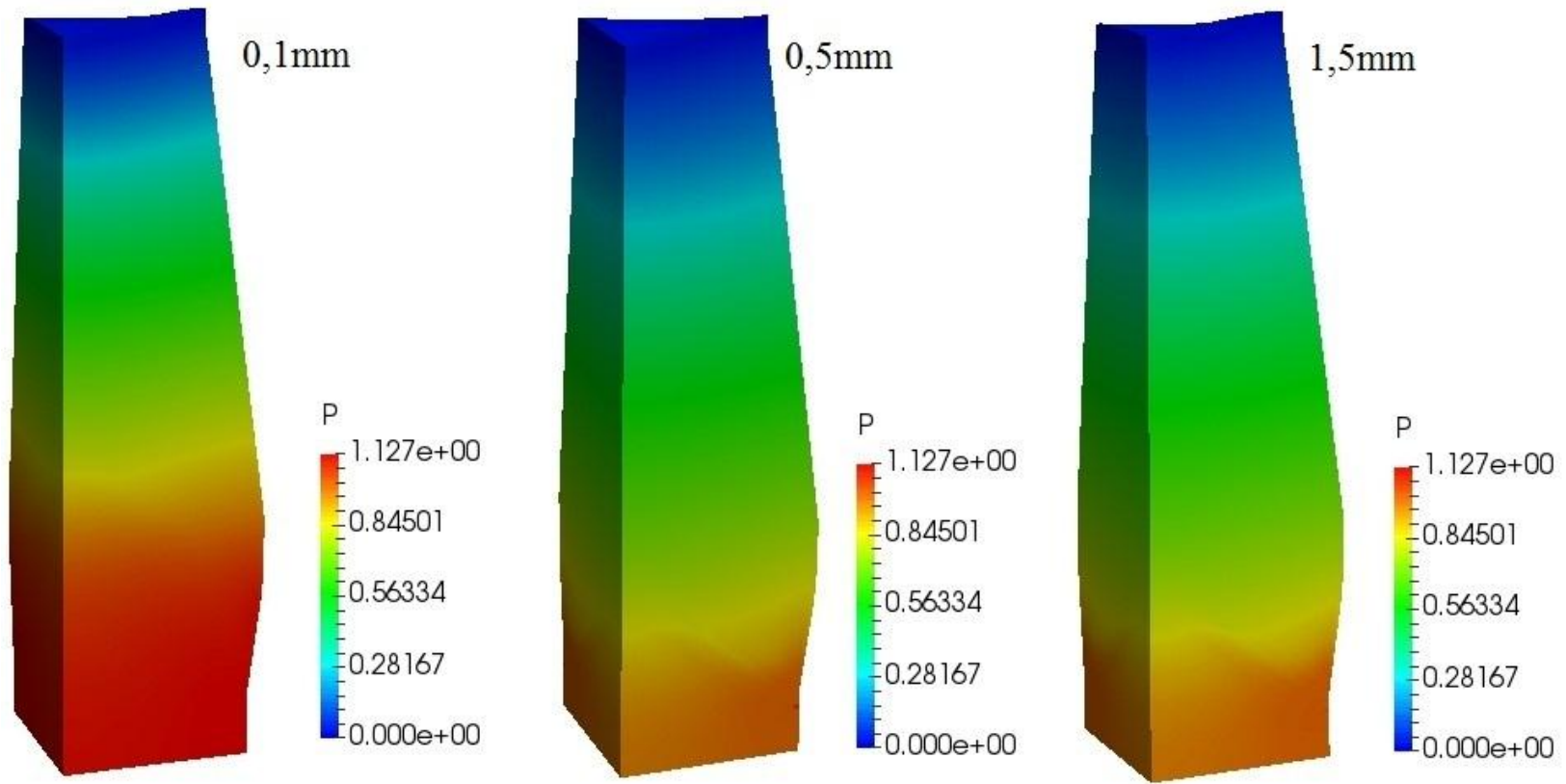


4.4. Analisa Distribusi Tekanan

4.4.1. Faktor ukuran diameter injeksi serbuk reduktor /PKS

Pada termodinamika tekanan memiliki hubungan yang linier dengan temperatur. Semakin tinggi temperatur maka tekanan akan semakin tinggi pula. Sedangkan dengan volume tekanan memiliki hubungan berbanding terbalik, semakin besar volume suatu benda maka tekanan yang dialami akan semakin turun. Pada *blast furnace* factor temperatur lebih mempengaruhi distribusi tekanan yang terjadi di dalam *blast furnace* sedangkan factor volume tidak mempengaruhi distribusi tekanan yang ada. Hal ini dikarenakan volume *blast furnace* tidak mengalami perubahan selama pemodelan berjalan. Untuk mengetahui perbedaan tekanan yang ada pada *blast furnace* parameter operasi yang sama untuk variasi ukuran serbuk arang yang di injeksikan ke dalam *blast furnace* yaitu dengan variasi 0,1mm, 0,8mm, dan 1,5mm. dengan variasi ini akan diketahui apakah benar ukuran diameter serbuk arang mempengaruhi distribusi temperatur sesuai dengan kaidah hukum termodinamika.

Hasil distribusi tekanan karena factor pengaruh ukuran diameter serbuk arang yang di injeksikan terlihat pada gambar 4.12. Pada gambar ini dapat diketahui semakin kecil ukuran diameter dari serbuk arang akan menaikkan luasan area tekanan dengan range 0,8-1,27 atm. Pada ukuran serbuk arang 0,1mm terlihat dengan jelas area luasan distribusi tekanan dengan range 0,8-1,27 atm memiliki luasan paling besar dibandingkan dengan ukuran diameter 0,8 dan 1,5mm, akan tetapi intensitas tekan tertinggi tidak mengalami perubahan untuk ketiga parameter yang ada yaitu tekanan maksimal 1,27atm. Dengan demikian sesuai dengan hipotesa awal distribusi tekanan yang ada di dalam *blast furnace* cenderung dipengaruhi oleh distribusi temperatur yang diterima oleh *blast furnace* bukan dari aspek yang lain seperti populasi gas yang ada di dalam *blast furnace*. Keberadaan spesies gas yang ada hanya memberikan sedikit dampak terhadap distribusi tekanan yang ada di dalam *blast furnace*.



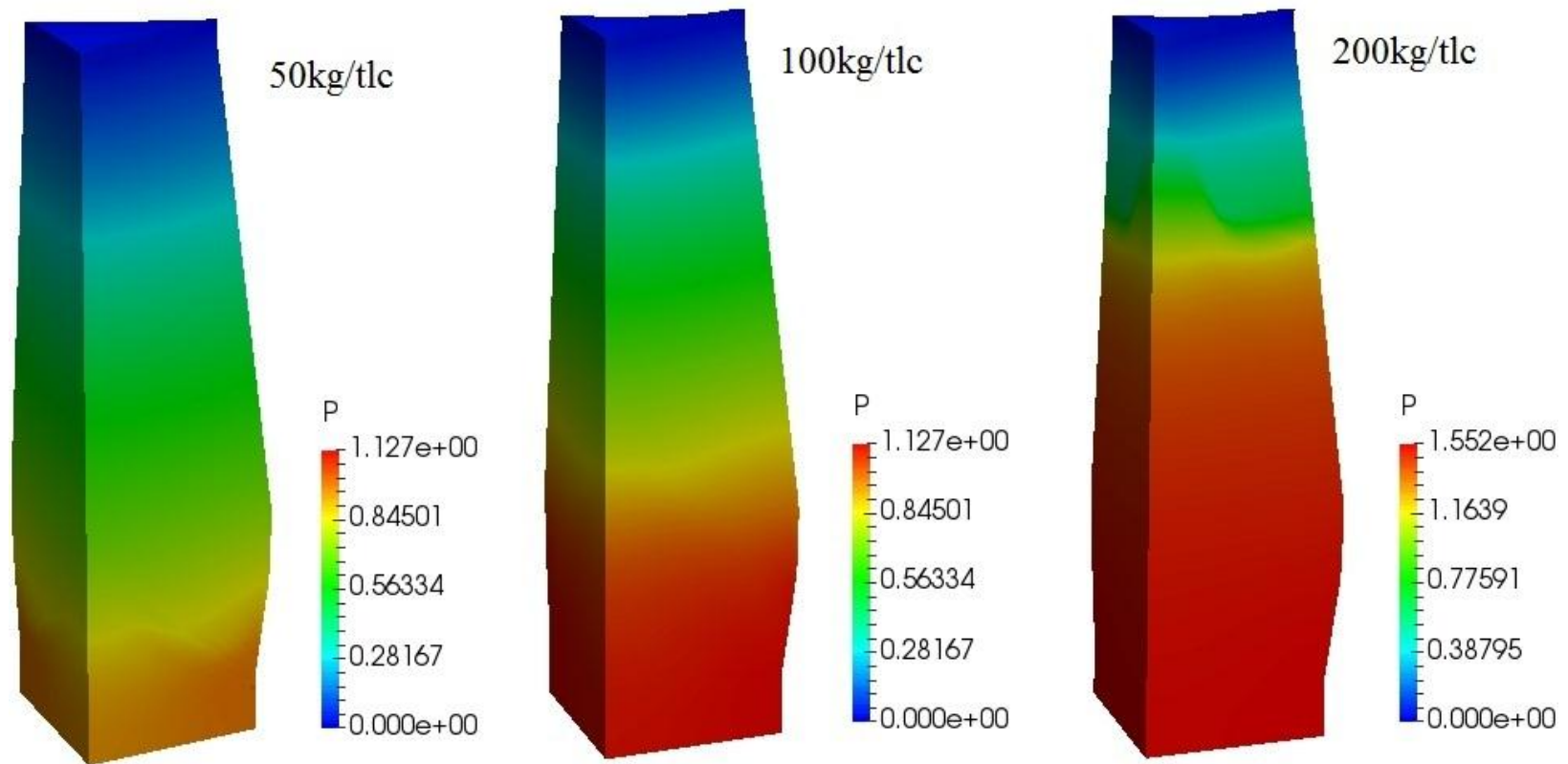
Gambar 4.12. Distribusi tekanan pada *blast furnace* karena faktor ukuran diameter serbuk reduktor yang di injeksikan



4.4.2. Faktor jumlah injeksi serbuk reduktor /PKS

Jumlah serbuk arang yang di injeksikan ke dalam *blast furnace* akan mempengaruhi kontur temperatur di dalam reaktor *blast furnace*. Daerah pembakaran atau *combustion zone* dan *raceway* pada pembahasan distribusi temperatur mengalami pengaruh yang paling tinggi akibat penambahan jumlah serbuk arang yang di injeksikan. Hal ini karena secara teori, semakin banyak jumlah serbuk arang yang di injeksi maka kuantitas karbon pada daerah *combustion* akan mengalami kenaikan dan pembakaran karbon karena bereaksi dengan oksigen akan semakin tinggi. Semakin tinggi kuantitas karbon yang bereaksi dengan oksigen akan berdampak pada semakin besar pula energi yang dihasilkan karena reaksi antara karbon dengan oksigen merupakan reaksi eksotermik (melepas panas). Reaksi eksotermik antara karbon dengan oksigen akan menyebabkan kenaikan temperatur. *Blast furnace* adalah sebuah reaktor yang bekerja dengan prinsip *counter current flow*, oleh karena itu pada saat arang pada bagian bawah atau daerah pembakaran habis bereaksi maka lapisan arang pada bagian atas akan turun mengisi kekosongan tersebut sehingga setiap saat pada bagian pembakaran ketersediaan karbon selalu ada.

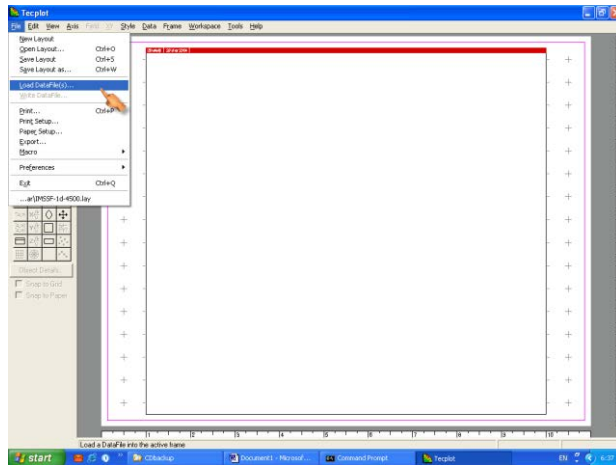
Untuk mengetahui pengaruh jumlah serbuk arang yang di injeksikan terhadap distribusi tekanan pada *blast furnace* dapat dilihat pada gambar 4.13. Semakin besar jumlah arang yang di injeksikan ke dalam *blast furnace* maka intensitas tekanan akan meningkat dengan pola tekanan tertinggi terletak pada *raceway* atau bagian bawah *blast furnace* dan berangsur turun pada bagian atasnya. Perbedaan luasan tekanan cukup signifikan tampak pada penggunaan serbuk arang 200kg/tlc. Sedangkan pada penggunaan arang 50 kg/tlc dan 100 kg/tlc perbedaan hanya tampak pada bagian bawah saja dengan intensitas tekanan tertinggi yang sama. Fenomena ini sama dengan pola dan intensitas distribusi temperatur dengan parameter operasi yang sama, sehingga dapat disimpulkan tekanan yang ada sangat dipengaruhi oleh distribusi temperatur.



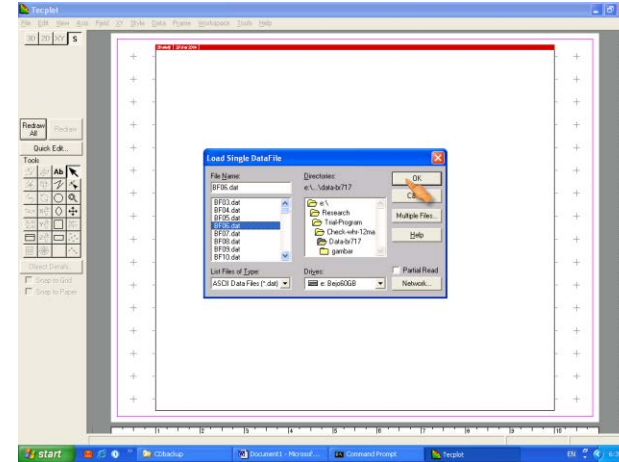
Gambar 4.13. Distribusi tekanan pada *blast furnace* karena faktor jumlah serbuk reduktor yang di injeksikan



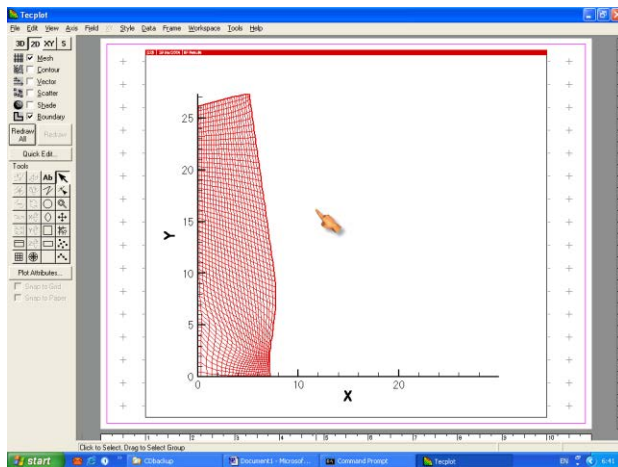
(halaman sengaja dikosongkan)



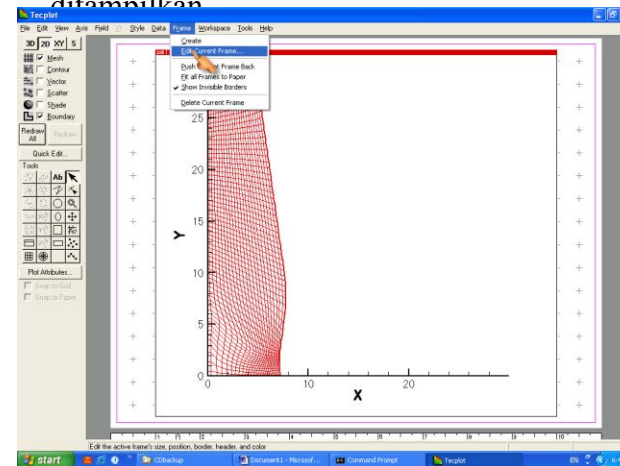
1. Membuka File dat



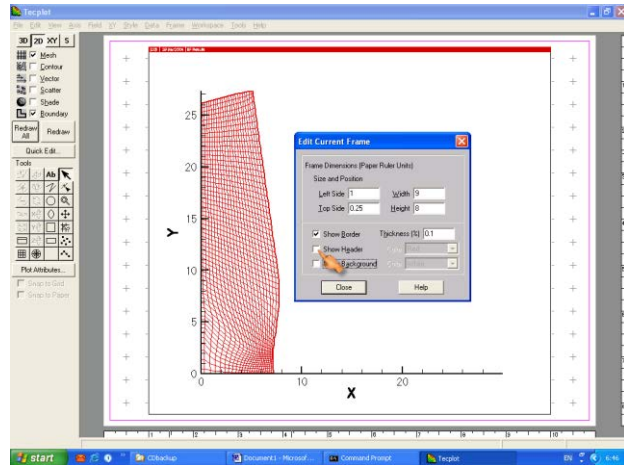
2. Memilih jenis data yang akan
ditampilkan



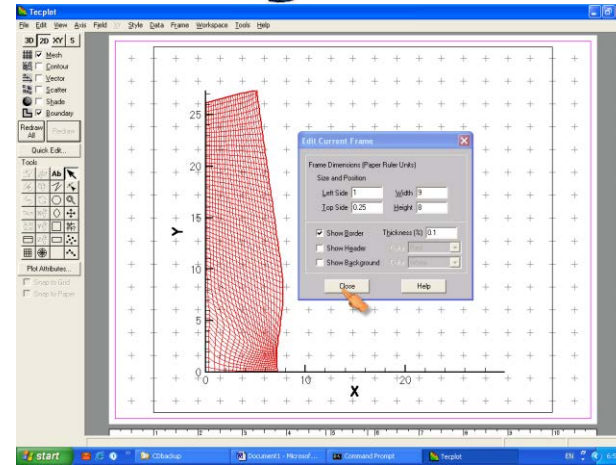
3. atur skala



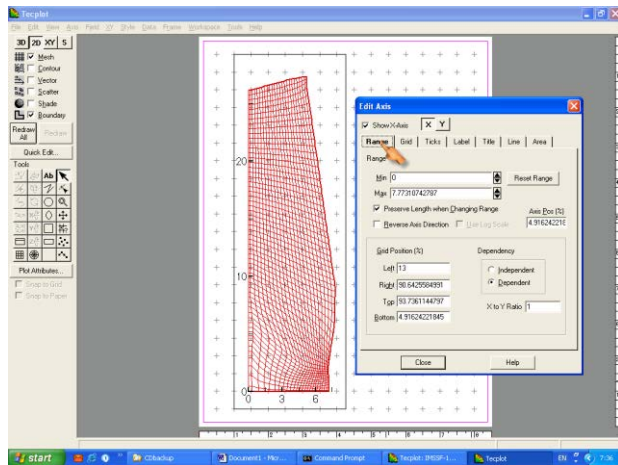
4. atur grade



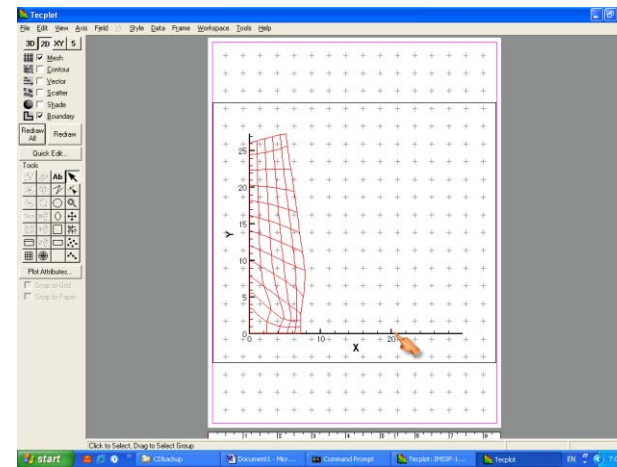
5. menghilangkan header dan background



6. Atur format kertas



7. Klik mesh dan redraw untuk melihat grid



From this dialog-
Set size, type
etc. of label from
attribute you want
this box

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini antara lain :

1. Semakin kecil ukuran serbuk PKS maka menaikkan distribusi temperatur pada bagian bawah *blast furnace* yaitu berkisar 1700 C dan semakin tinggi jumlah serbuk arang yang di injeksikan ke dalam *blast furnace* akan menaikkan temperatur di bagian cohesive zone dan raceway.
2. Distribusi gas karbon dioksida dan monoksida hanya sedikit dipengaruhi oleh ukuran serbuk arang yang diinjeksikan kedalam *blast furnace* dimana hasil yang ada tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan hanya terjadi perbedaan yang signifikan pada bagian bawah *blast furnace* terutama untuk konsentrasi gas karbon monoksida yaitu terjadinya kenaikan konsentrasi.
3. Semakin besar jumlah serbuk karbon yang di injeksikan kedalam *blast furnace* akan menaikkan konsentrasi gas karbon dioksida dan monoksida..
4. Semakin kecil ukuran diameter dan semakin besar jumlah serbuk arang yang di injeksikan ke dalam *blast furnace* akan menaikkan tekanan dan kecepatan fluid material yang ada dalam *blast furnace*

5.2 Saran

Saran dari penulis untuk peneltian selanjutnya antara lain :

1. Working volume pada model dapat diperkecil sesuai dengan kebutuhan penelitan.
2. Dapat dikembangkan dengan menggunakan jenis ore yang lain seperti ore nikel atau tembaga.

DAFTAR PUSTAKA

- Bambang Pardiarto, 2011, "Peluang Bijih Besi Dalam Pemenuhan Kebutuhan Komoditas Mineral Strategis", Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.
- Gaskell, R.D., (1981), *Introduction to Thermodynamics of Materials*, 2nd edition, Mc Graw Hill, New York
- G.Danloy, J.Mignon, R. Munnix, G.Dauwels, L. Bonte, 2002, " *A Blast Furnace Model to Optimize the Burden Distribution*", Belgium.
- H. Nogami, Mansheng Chu, J. Yagi, 2006, "Numerical analysis on blast furnace performance with novel feed material by multi-dimensional simulator based", mathematical modelling 30, Jepang.
- Jose Adilson de Castro, 2000, *A Multi-Dimensional Transient Mathematical Model of Blast Furnace Base on Multi-Fluid Model*, Tohoku University, jepang
- J. Yagi, H. Nogami, Aibing Yu, 2006, "Multi-dimensional mathematical model of blast furnace based on multi-fluid theory and its application to develop super-high efficiency operations", international conference on CFD in the process industries, Australia.
- J Yagi, Hiroshi Nagomi, Mansheng CHU, 2003, "Numerical Analysis on Blast Furnace Performance Dimensional Transient Simulator Based on Multy-Fluid Theory", international conference on CFD in the process industries, Australia.
- Japan Keirin Association (2010), *Consulting Service Report for Improving the Efficiency of Carbonizing Plant for PKS Charcoal, Malaysia*.
- Oscar Lingardi, Oscar Burrai, Claudia Pertimo, F Giandomenico, Pedro Etchevarne, 2001, " *High Productivity and Coke rate Reduction at Siderar Blast Furnace*", 1st International Meeting on Iron Making, Brasil.
- Pusat Sumber Daya Geologi (2009), *Tinjauan Rencana Pembangunan Industri Besi-Baja Di Kalimantan selatan, Kelompok Program Peneliti Mineral, Bandung-Indonesia*.
- S Natsui, Sigeru Ueda, Hiroshi Nagomi, J Kano, Ryou Inoue, 2011, "Analysis on Non-Uniform Gas Flow in Blast Furnace Base on DEM-CFD Combine Model", *Steel Research Int* 82 No.8

- Sungging Pintowantoro, 2005, *Fundamental Study of Powder Deposition in Blast Furnace Base on Multi-Fluid Theory*, Tohoku University. Jepang
- Teuku Ishlah, 2011, *Potensi Bijih Besi Indonesia Dalam Kerangka Pengembangan Klaster Industri Baja*, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.
- Upadhyaya, S.G., Dube, K.R., (1977), *Problems in Metallurgical Thermodynamics and Kinetics*, 1st edition, Pergamon Press, Oxford.
- Yansong Shen, Aibing Yu, P Austin, 2009, “*Paul Zulli, In-Furnace Modelling of Pulverized Coal Injection in an Ironmaking Blast Furnace: Effect of Key Variables On Gas Distribution*”, Australia.

Anni Rahmat, kelahiran Tuban, 29 Agustus 1983, adalah putra ketujuh dari pasangan Zamahsari dan Salkah. Memulai pendidikan formalnya di TK Dharma Wanita Mondokan Tuban. Pendidikan selanjutnya yaitu di SDN Latsari II Tuban, SMPN 3 Tuban, SMAN 1 Tuban, dan kemudian melanjutkan studi Sarjana dan Pascasarjana di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS Surabaya.

Penulis pernah tercatat sebagai Asisten Dosen Mekanika Teknik, Asisten Dosen Karakterisasi Material, dan sebagai karyawan aktif Badan Tenaga Nuklir Nasional sejak 2008. Diluar kegiatan keakademisan penulis juga aktif dalam berbagai organisasi sosial diantaranya sebagai Wasekjen Komjur IKAMAT ITS, Anggota KAHMI Jawa Timur, Pendamping Pemberdayaan Masyarakat Al Azhar Peduli Umat. Berkat Rahmat Allah SWT, penulis dapat menyelesaikan tesis pada bidang Metalurgi manufaktur yang berjudul **“Studi Performa *Blast Furnace* Dengan Sumber Reduktan Arang Berbasis Pemodelan”**

E – mail : ar298@batan.go.id

Alamat : Joko Tingkir Residence Blok F No.3 Lamongan

Telepon : 081289053951



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara yang memiliki sumber daya alam mineral yang relatif tinggi di kawasan Asia. Diantara sumberdaya alam mineral tersebut adalah bijih besi, laterit nikel, monasit, bijih tembaga dan lain lain. Tingginya sumber daya alam mineral ini memberikan keuntungan di sektor keuangan bagi masyarakat pada umumnya serta pendapatan negara pada khususnya. Paska berlakunya undang-undang minerba No 4. Tahun 2009 tentang peningkatan nilai tambah mineral dan batu bara melalui kegiatan pengolahan dan pemurnian mineral dan batu bara mulai tanggal 12 januari 2014 maka ekspor mineral mentah sudah tidak dapat dilakukan. Solusi untuk mengurai permasalahan ini adalah dengan dibangunnya alat-alat pengolahan mineral salah satunya adalah pembuatan *blast furnace*. Kajian desain *blast furnace* membutuhkan biaya yang relatif tinggi, sebagai langkah awal maka dapat dilakukan sebuah pemodelan yang dapat mengakomodir desain dari aspek proses dan parameter yang ada dalam pengoperasian *blast furnace* sehingga efisiensi biaya dapat ditekan.

Dalam proses pembuatan *pig iron* atau besi kasar dengan menggunakan *blast furnace* dibutuhkan reduktan untuk mereduksi oksida besi. Pada umumnya sumber reduktan yang digunakan dalam *blast furnace* adalah kokas dan batu bara. Permasalahan muncul saat limbah hasil pembakaran kokas dan batubara yang tidak ramah lingkungan dan dikategorikan sebagai limbah B3. Oleh karena itu diperlukan sumber reduktan baru yang lebih ramah lingkungan dan tetap dapat membuat proses reduksi oksida besi terjadi pada *blast furnace*. Untuk melakukan reduksi secara langsung oksida besi dibutuhkan karbon dan untuk mereduksi secara tak langsung oksida besi dibutuhkan gas karbon dioksida. Sumber dari kedua reduktan ini dapat berasal dari arang atau batu bara. Kelebihan dari arang dibanding batu bara adalah dalam arang tidak terkandung sulfur sehingga akan menaikkan kualitas produk besi spon karena kandungan sulfur akan turun. Selain itu gas hasil pembakaran arang tidak masuk dalam kategori limbah B3 sehingga



penggunaan arang sebagai sumber reduktan dapat menjadi lebih ramah lingkungan. Disamping itu ketersediaan arang kelapa sawit (Palm Kernel Shell Charcoal/PKS) menjadi salah satu solusi untuk sumber reduktan alternative sebagai sumber reduktan dalam pembuatan besi spon dengan *blast furnace*.

Pada penelitian ini akan dilakukan pemodelan *blast furnace* dengan menggunakan sumber reduktan arang PKS. Dengan menggunakan pemodelan dapat dilakukan kajian terhadap pengaruh penggunaan PKS terhadap distribusi temperatur, tekanan serta kecepatan alir yang dapat mempengaruhi proses reduksi oksida besi.

1.2 Rumusan masalah

Penelitian ini memiliki beberapa perumusan masalah, antara lain :

1. Bagaimana pengaruh penggunaan ukuran diametr serbuk arang dan jumlah arang yang di injeksikan terhadap distribusi temperatur, tekanan dan kecepatan aliran pada pemodelan *blast furnace*?
2. Bagaimana pengaruh distribusi gas karbon dioksida dan monoksida terhadap karena ukuran diameter serbuk arang dan jumlah arang yang di injeksikan pada pemodelan *blast furnace* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan, antara lain :

1. Menganalisis profil temperatur, tekanan dan kecepatan aliran yang ada pada desain *blast furnace*.
2. Menganalisis kecepatan produksi dan limbah gas dari penggunaan arang pada pemodelan *blast furnace* .

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat untuk memberikan informasi empirik dan parameter proses yang optimal untuk mengolah ore/bijih besi nasional menjadi besi kasar dengan menggunakan pemodelan *blast furnace*, serta dapat digunakan untuk acuan kerja para operator di industri pengolahan besi dan baja yang ada di Indonesia.



1.5 Batasan Masalah

Pada penelitian ini memiliki beberapa batasan masalah yaitu :

1. Material bahan baku dianggap homogeny.
2. Desain reaktor *blast furnace* yang digunakan dalam pemodelan dianggap sudah baik dari aspek struktur.
3. Pemodelan dilakukan dalam keadaan *steady state* tiga dimensi axisimetris.
4. Validasi dilakukan dengan perbandingan hasil perhitungan dengan peneliti sebelumnya
5. Distribusi rongga gas dalam *blast furnace* diasumsikan konstan.



(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB II

DASAR TEORI DAN KAJIAN PUSTAKA

2.1 Besi dan Bijih Besi

Besi dan baja adalah logam dengan sifat mekanik yang sangat baik sehingga banyak dimanfaatkan oleh manusia. Hampir semua lini dari peradapan manusia modern saat ini memerlukan besi dan baja baik di sektor transportasi, sektor energi, sektor kesehatan dan sektor pertanian. Faktor inilah yang menyebabkan kenaikan kebutuhan besi dan baja dari tahun ke tahun selalu meningkat seiring dengan laju pertumbuhan ekonomi dan penduduk. Besi dan baja didapatkan dari berbagai jenis mineral yang mengalami proses ekstraksi dengan berbagai bantuan peralatan, salah satunya dengan menggunakan *blast furnace*. Mineral yang dapat diproses menjadi bahan baku besi dan baja berasal dari jenis cebekan besi yang lebih dikenal sebagai *cherty banded iron formation/BIF*.

Secara geografis wilayah Indonesia merupakan busur magnetis yang hanya memiliki sedikit cebekan besi bertipe BIF. Bijih besi di Indonesia di golongan dalam tiga jenis yaitu besi primer (jenis oksida), jenis hidroksida dan jenis titanious ferrous.

- Bijih besi primer (jenis oksida)



Gambar 2. 1 Bijih besi hematit

Bijih besi primer adalah bijih besi yang memiliki kandungan Fe teoritis maksimal 72%. Bijih besi yang masuk dalam kategori bijih besi primer adalah bijih besi magnetit dan hematit. Magnetit adalah bijih besi dengan rumus kimia